

## مطالعه ریزساختار و فصل مشترک در کامپوزیت های Al/SiC<sub>p</sub> تولید شده به روش فشردن انفجاری

حسین اسکندری

دانشجوی دکتری مهندسی مواد- پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

مسعود امامی

دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

حمید رضا قاسمی منفرد راد

دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

سعید برجی

استادیار دانشگاه مالک اشتر

(تاریخ دریافت ۸۳/۷/۲۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۲/۱۳، تاریخ تصویب ۸۴/۳/۲۱)

### چکیده

فشردن انفجاری پودر که از فرآیندهای پر انرژی و با سرعت بالا به حساب می آید فرآیند رو به توسعه ای است که ویژگیهای متمایز و منحصر به فردی را نسبت به روش های معمولی متالورژی پودراز خود نشان می دهد. در این روش شکل گیری کامپوزیت در چند میکروثانه و توسط موج انفجار انجام می گیرد که به همین دلیل انتظار می رود اندرکنش های مخرب بین فاز زمینه و فاز تقویت کننده حذف شوند. در این تحقیق ضمن مطالعه پارامترهای مؤثر بر فرآیند ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیمی ذره ای به روش فشردن انفجاری، تغییرات دانسیته فشردده های سیستم کامپوزیتی Al-20vol%SiC<sub>p</sub> نسبت به تغییرات ضخامت لایه ماده منفجره بررسی شد. ریزساختار و فصل مشترک زمینه و ذرات با استفاده از میکروسکوپ نوری، الکترونی روبشی (SEM) <sup>۱</sup> و الکترونی عبوری (TEM) <sup>۲</sup> مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهدات نشان دادند که توزیع ذرات SiC در زمینه آلومینیمی در اطراف و مرکز سطح مقطع نمونه های کامپوزیتی متفاوت می باشند و بررسی های انجام شده با میکروسکوپ الکترونی، وجود محصولات واکنش از جمله Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> را در ناحیه فصل مشترک ذرات SiC و زمینه آلومینیمی آشکار ساخت که می تواند شهادی بر تمیز بودن فصل مشترک در کامپوزیت ساخته شده به این روش باشد.

واژه های کلیدی: فشردن انفجاری، کامپوزیت زمینه آلومینیمی، فصل مشترک، SEM-TEM

### مقدمه

کامپوزیت ایفا می کند [۲]. تشکیل فازهای ناخواسته و مخرب مانند کاربید آلومینیم (Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>) در فصل مشترک زمینه و ذرات SiC که در فرآیندهای ساخت کامپوزیت بویژه در روشهای ذوبی بوجود می آیند باعث کاهش خواص مکانیکی کامپوزیت های زمینه آلومینیمی می شوند [۳]. یکی از روشهای کنترل ایجاد واکنش های مرزی مخرب، کنترل عوامل مؤثر بر فرآیند تولید کامپوزیت می باشد [۴]. فرآیندهایی که در سرعت های بسیار بالا کامپوزیت را شکل می دهند، مانند فشردن انفجاری، بعنوان روشی جذاب برای متراکم سازی و ساخت پودرها و کامپوزیت های زمینه آلومینیمی مطرح هستند [۵، ۶]. در

کامپوزیت های زمینه آلومینیمی (AMC) <sup>۳</sup> در سالهای اخیر به دلیل مدول الاستیسیته و استحکام ویژه بالا، دانسیته پایین و مقاومت به سایش عالی و خواص خستگی و خزشی خوب می توانند جایگزین مناسبی برای مواد مورد مصرف در صنایع هوا-فضا، اتومبیل سازی و الکترونیک باشند که بدین لحاظ در کانون توجه محققان قرار گرفته اند. در این میان کامپوزیت های زمینه آلومینیمی تقویت شده با ذرات سرامیکی به علت دارا بودن خواص مکانیکی مشابه در سه بعد بیشتر مورد علاقه می باشند [۱]. ماهیت فصل مشترک بین زمینه و ذره تقویت کننده نقش مهمی در تعیین خواص مکانیکی

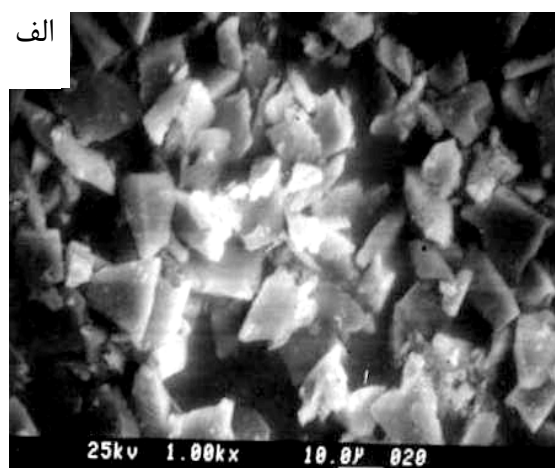
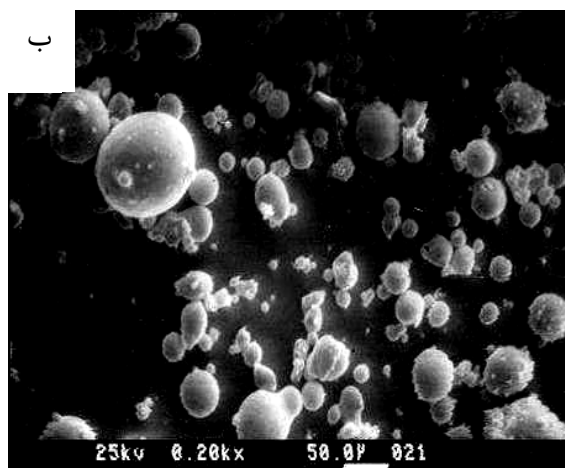
قبل از عمل مخلوط سازی نشان می‌دهد. فشردن انفجاری در یک مجموعه قالب متقارن استوانه‌ای که در شکل (۲) بطور شماتیک نشان داده شده انجام گرفت. در این روش پودرها پس از مخلوط‌سازی، بطریق ارتعاش دستی در یک لوله فولادی مرکزی ریخته شده و بوسیله یک لایه یکنواخت ماده منفجره TNT احاطه گردیدند. انفجار ماده منفجره یک موج شوک استوانه‌ای همگرا ایجاد می‌کند که سبب لهیدگی لوله و پودر محتوی آن می‌شود. عبور موج انفجار از میان ذرات پودر تغییر شکل پلاستیک شدیدی ایجاد می‌کند که اصولاً در اطراف و مرزهای ذرات رخ می‌دهد. این تغییر شکل پلاستیک و اصطکاک بین ذرات باعث بالا رفتن دما و ذوب موضعی سطحی می‌شود که عامل مؤثری در پیوند ذرات می‌باشد [۹]. بمنظور بررسی اثر ضخامت لایه ماده منفجره بر دانسیته و ریزساختار، لایه مذکور از ۷/۵ تا ۲۱ میلیمتر تغییر داده شد (جدول ۱). دانسیته نمونه های کامپوزیتی حاصله بعد از فشردن به روش ارشمیدس اندازه‌گیری گردیدند. ریزساختار مواد حاصله با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی (SEM, TEM) مورد مطالعه قرار گرفت.

بمنظور آماده‌سازی نمونه‌های TEM، ابتدا ورقه‌های نازکی از نمونه کامپوزیتی موردنظر بریده شد سپس با استفاده از سنگ‌زنی مکانیکی و برداشت یونی<sup>۵</sup> تا حد مناسب جهت مطالعه با TEM نازک گردید. نمونه‌های TEM با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری JEOL2000F مورد مطالعه قرار گرفت.

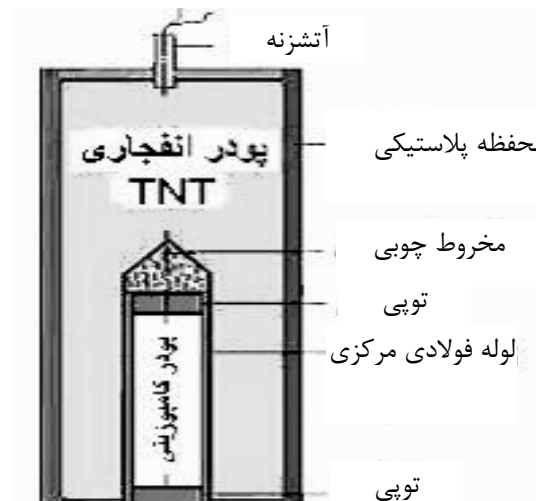
این روش، موج شوک‌های حاصل از انفجار با عبور از درون مخلوط پودر کامپوزیتی محصور شده در یک محفظه فلزی موجب متراکم شدن و تبدیل آن به یک قطعه صلب و جامد می‌شود. این فرآیند در مقایسه با روشهای فشردن استاتیکی مورد استفاده در متالورژی پودر مزیت‌هایی دارد [۷]. از میان آنها می‌توان به امکان دستیابی به دانسیته خیلی بالا (دانسیته تئوری کامل) و پیشگیری از وقوع واکنش بین ذرات SiC و زمینه اشاره نمود. در این پژوهش پودر کامپوزیتی  $Al-20vol\%SiC_p$  به روش فشردن انفجاری متراکم گردیده و اثر ضخامت لایه ماده منفجره [۸]، بعنوان یکی از پارامترهایی که در فرآیندهای دینامیکی فشردن پودرها مورد استفاده محققان می‌باشد، بر میزان دانسیته فشرده‌های کامپوزیتی مورد مطالعه قرار گرفته است. علاوه بر آن، نحوه توزیع ذرات SiC در زمینه آلومینیمی و احتمال وقوع واکنش مرزی در بین ذرات SiC و زمینه نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و عبوری (TEM) و همچنین پراش اشعه ایکس (XRD) ارزیابی و مطالعه گردیدند.

## مواد و روش آزمایش

در این پژوهش پودر آلومینیمی خالص کروی شکل اتمیزه شده با اندازه متوسط ۴۵ میکرون و پودر خالص SiC (بیش از ۹۹ درصد) با اندازه متوسط ۱۵ میکرون مورد استفاده قرار گرفتند. این پودرها بوسیله یک مخلوط‌کننده دو سر مخروطی و بمدت یک و نیم ساعت مخلوط شدند. شکل (۱) مورفولوژی پودرهای مذکور را



شکل ۱: مورفولوژی پودرهای مورد استفاده در این تحقیق الف - پودر SiC ب - پودر Al.



شکل ۲: شماتیک محفظه استوانه ای فشردن انفجاری.

جدول ۱: اثر ضخامت لایه ماده منفجره بر دانسیته و قطر ناحیه میانی نمونه های کامپوزیتی حاصله.

شماره	ضخامت لایه ماده منفجره (EPT, mm)	فشار (Kbar)	دانسیته (درصد تئوری)	قطر ناحیه میانی ( $\mu\text{m}$ )
۱	۷/۵	۴/۳	۹۶	-
۲	۸/۵	۸/۹	۹۷/۶	۳۱۱۱
۳	۹/۵	۱۴	۹۸	۱۱۵۷
۴	۱۰/۵	۱۹/۶	۹۸/۵	۴۵۰
۵	۱۱/۵	۲۵/۷	۹۷/۷	-
۶	۱۳	۲۸/۱	۹۶/۲	۹۳۴
۷	۱۴/۵	۳۰/۵	۹۵/۲	-
۸	۱۶	۳۳/۶	۹۵	۲۰۴۵
۹	۲۱	۴۰/۹	۹۳/۷	-

آمد. کمتر شدن دانسیته بعد از ضخامت ۱۰/۵ میلی متری را می توان باتوجه به فشار ایجاد شده توسط ماده منفجره بر روی پودر کامپوزیتی توضیح داد. فشار انفجار اعمالی،  $P$ ، بر روی دیواره لوله متناسب با مربع سرعت انفجار،  $V_d^2$  و دانسیته ماده منفجره،  $\rho$ ، می باشد [۱۰]:

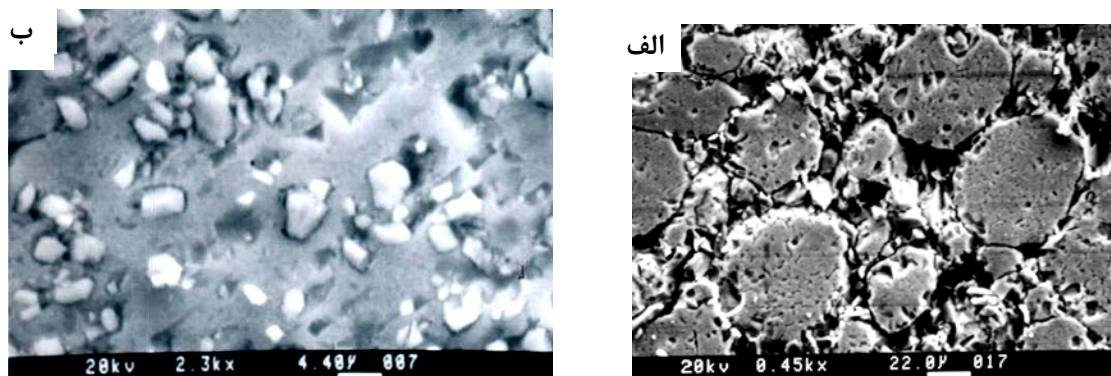
$$P = \frac{1}{4} \rho V_d^2 \quad (1)$$

با توجه به اینکه سرعت انفجار ماده منفجره متناسب با ضخامت لایه ماده منفجره تغییر می کند [۱۰ و ۱۱]، فشار ایجاد شده بر روی پودر نیز به ضخامت ماده منفجره بستگی دارد. روشن است که حداکثر دانسیته فشرده ها در

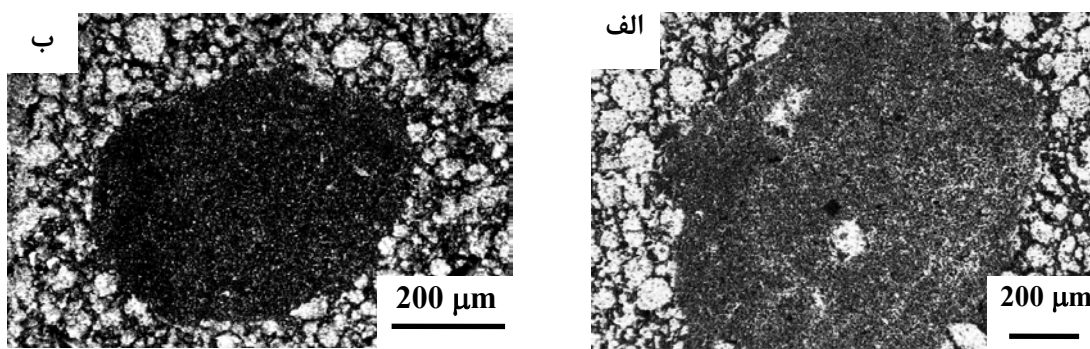
## نتایج و بحث

### الف- اثر ضخامت لایه ماده منفجره بر دانسیته

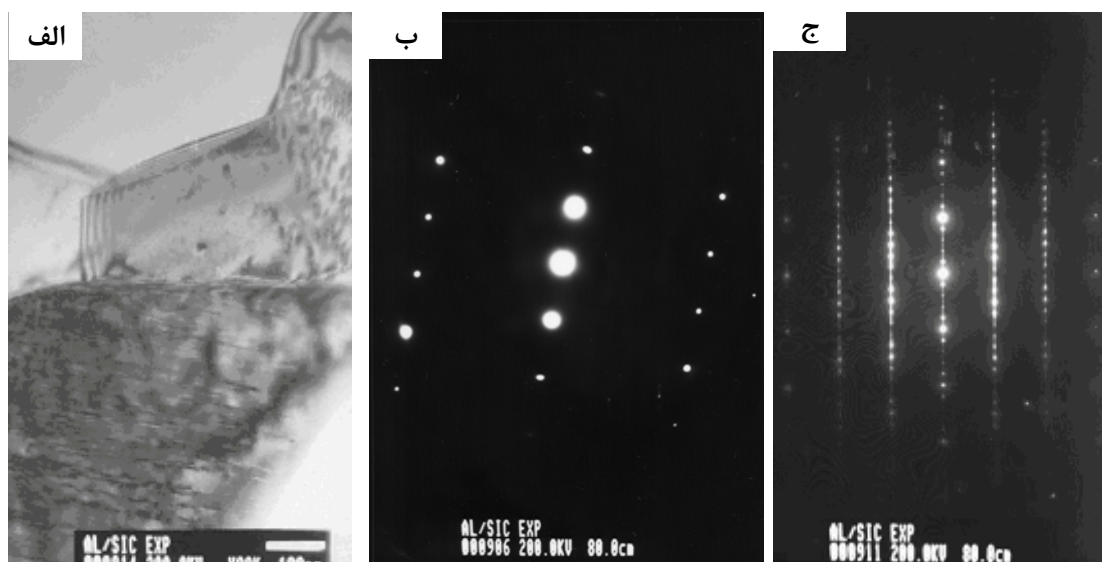
تأثیر ضخامت لایه ماده منفجره (فضای خالی بین لوله فولادی مرکزی و لوله پلاستیکی بیرونی) بر روی دانسیته فشرده های آلومینیمی تقویت شده با ۲۰ درصد حجمی ذرات SiC در جدول (۱) نشان داده شده است، مشاهده می شود که با افزایش ضخامت لایه ماده منفجره از ۷/۵ به ۱۰/۵ میلی متر، دانسیته نمونه های کامپوزیتی از ۹۶ به ۹۸/۵ درصد دانسیته تئوری افزایش یافته و پس از آن کاهش می یابد بطوریکه در ضخامت ۲۱ میلی متری، نمونه ای با دانسیته ۹۳/۷ درصد دانسیته تئوری بدست



شکل ۳: عکسهای میکروسکوپ الکترونی سطح مقطع برش عرضی کامپوزیت ساخته شده در حالت ۱۰/۵ میلیمتر ضخامت لایه ماده منفجره: الف- ناحیه کنار سطح مقطع، ب- ناحیه میانی سطح مقطع.



شکل ۴: عکسهای میکروسکوپ نوری مقطع برش عرضی کامپوزیت های ساخته شده با ضخامت لایه ماده منفجره الف- ۹/۵ mm و ب- ۱۰/۵ mm. قطر حدود ناحیه میانی در الف بیشتر میباشد.

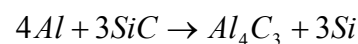


شکل ۵: مشاهدات TEM حاصل از نمونه مربوط به شکل ۴، الف: تصویر میدان روشن ب: الگوی SAD مربوط به فاز آلومینیم FCC ج: الگوی SAD مربوط به ساختار هگزاگونال SiC.

دست می دهد. گونه سوم رفتار موج با افزایش فشار به طرف محور نمونه شکل میگیرد. تغییرات ریزساختاری در فشرده شکل (۳) را می توان با در نظر گرفتن تغییر فشار در عرض سطح مقطع بهنگام انفجار توضیح داد. طبق یک اصل شناخته شده فشار

ایجاد می دهد. فشردن انفجاری مستقیم استوانه ای از ناحیه کناری بسمت مرکز افزایش می یابد [۱۴]. پیوند کمتر مستحکم ذرات SiC در ناحیه اطراف مرکز را می توان به فشار انفجار غیرکافی برای متراکم نمودن فشرده نسبت داد. وقتی بطور شعاعی بسمت مرکز حرکت می کنیم فشار در اثر موج شوک های همگرا افزایش می یابد. افزایش فشار باعث توزیع یکنواخت ذرات کاربیدی در زمینه آلومینیمی می شود چنین ساختاری در مرکز فشرده در اثر پدیده نرم شدن<sup>۷</sup> زمینه آلومینیمی و توزیع همزمان ذرات SiC شکسته شده در اثر فشار زیاد ایجاد می گردد. ریز سختی در کناره های سطح مقطع فشرده ۶۷/۵ برینل و در مرکز آن ۳۱/۸ برینل اندازه گیری شد که تاییدی بر صحت مطلب فوق می باشد. این امر بدلیل ذوب کامل و انجماد زمینه در اثر دماهای خیلی بالای ایجاد شده بوسیله موج های شوک همگرا می باشد [۱۵].

در کامپوزیتهای Al/SiC<sub>p</sub>، کاربید آلومینیم، Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> در فصل مشترک ذرات SiC و زمینه آلومینیم طبق واکنش زیر تشکیل می گردد [۱۶].



(۲)

بطور کلی فاز Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> اثر مخربی بر روی خواص کلی کامپوزیت دارد. اصولاً فازی است بسیار ترد و غیر پایدار که باعث ضعف خواص فیزیکی و مکانیکی ذرات تقویت کننده در کامپوزیت می شود. از آنجا که واکنش فوق به دما و زمان نگهداری بستگی دارد لذا روش فرآیند ساخت حدود این واکنش مرزی را تحت تأثیر قرار می دهد [۱۷]. فشردن انفجاری یک فرآیند متراکم سازی خیلی سریع است که مشتمل بر عملیات گرمایی طولانی نیست و در نتیجه حتی اگر دماهای بالای ایجاد شده در ناحیه میانی بر اثر فشار همگرای موج انفجار، وقوع رابطه (۱) را کفایت نکند، بدلیل زمان فرآیند خیلی کوتاه از انجام واکنش بین زمینه آلومینیمی و ذرات SiC جلوگیری می شود.

شکل (۵) تصویر میکروسکوپی TEM فصل مشترک بین SiC و Al را در مورد فشرده Al-20vol%SiC<sub>p</sub> نشان

حالت ضخامت لایه منفجره ۱۰/۵ میلی متری بدست آمده است. کاهش دانسیته با افزایش ضخامت ماده منفجره بیشتر از ۱۰/۵ میلی متر را می توان به افزایش فشار انفجار و بنابراین ایجاد موجهای برگشتی قویتر نسبت داد که می تواند باعث تخریب موضعی پیوندهای ایجاد شده بین ذرات پودر گردد [۱۲].

## ب- مطالعات ریزساختاری و بررسی فصل مشترک ذرات SiC با زمینه آلومینیمی

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از مقطع برش عرضی کامپوزیت ساخته شده با ضخامت لایه ماده منفجره ۱۰/۵ میلی متری در شکل (۳) نشان داده شده است و در شکل (۴) تصویر میکروسکوپ نوری مقطع برش عرضی کامپوزیتهای ساخته شده با ضخامت لایه ماده منفجره ۹/۵ و ۱۰/۵ میلی متری ارائه شده اند. در این دو شکل، دو گونه توزیع ذرات SiC در ساختار مشاهده می شود: در ناحیه کنار سطح مقطع تا حد معینی از ناحیه مرکزی، ذرات آلومینیم زمینه توسط ذرات SiC احاطه شده اند (شکل ۳-الف). در این ناحیه بنظر می رسد پیوند بین زمینه و ذرات تقویت کننده خیلی مستحکم نیست چون مقدار زیادی حفره در اطراف ذرات آلومینیم در اثر کنده شدن ذرات SiC در حین پولیش دیده می شوند. در ناحیه مرکزی سطح مقطع (شکل ۳-ب) توزیع یکنواخت ذرات SiC در زمینه آلومینیمی دیده می شوند. پیوند بین ذرات SiC و زمینه در این ناحیه مستحکم تر بنظر می رسد که علت آنرا می توان به تفجوشی بهتر فشرده در این ناحیه دانست. حدود ناحیه میانی با تغییر ضخامت لایه ماده منفجره (EPT)<sup>۸</sup> متفاوت بود (جدول ۱ و شکل ۴). مشاهده می شود که با افزایش EPT از ۸/۵ به ۱۰/۵ میلی متر قطر ناحیه میانی از ۳۱۱۱ میکرون به ۴۵۰ میکرون کاهش می یابد و از آن به بعد با افزایش EPT افزایش می یابد. این پدیده به چگونگی رفتار موج انفجار درون پودر بستگی دارد. مطالعات انجام شده سه گونه رفتار را نشان می دهد [۱۳]. در حالت اول موج شوک وارد پودر شده و قبل از رسیدن به محور میرا می گردد. ظاهراً تا ضخامت ۱۰/۵ میلی متری این رفتار حاکم بوده است. گونه دوم که به نام موج شوک مخروطی شناخته میشود نشاندهنده ثبات سرعت و فشار درون فشرده است. این گونه رفتار موج، فشرده هایی با دانسیته یکنواخت را به

حدود ناحیه میانی با توجه به ضخامت لایه ماده منفجره متفاوت بود که علت این تفاوت حدود و توزیع ذرات را می‌توان به چگونگی رفتار موج انفجار درون پودر و همچنین تغییر فشار از اطراف سطح مقطع بطرف مرکز آن در حین فشردن انفجاری نسبت داد.

۳- براساس نتایج آزمایشگاهی بدست آمده با SEM و TEM روشن گردید که سطوح ذرات SiC تمیز و عاری از محصول واکنش فصل مشترکی در حین فشردن انفجاری است. زمان خیلی سریع فشردن علت عدم وقوع واکنش‌های مرزی نظیر تشکیل  $Al_4C_3$  در این فرآیند می‌باشد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان از مدیریت و کارکنان دانشکده مهندسی متالورژی، پژوهشکده مهمام به لحاظ حمایت از انجام این کار تحقیقی و همکاری در انجام آزمایشهای انفجاری تشکر می‌نمایند. لازم به ذکر است تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری با همکاری گروه پژوهشی پروفیسور نیشیدا و همکاری دکتر هوکوماتو در دانشگاه کوماموتو ژاپن تهیه گردید که از آنان سپاسگزاری بعمل می‌آید.

می‌دهد. می‌توان مشاهده نمود که فصل مشترک تمیز و عاری از هرگونه منطقه واکنش می‌باشد. این نتیجه با اطلاعات بدست آمده ازپراش اشعه ایکس XRD در تحقیق انجام شده بوسیله نویسندگان این مقاله [۱۸] نیز همخوانی دارد.

علاوه بر آن ترک‌های فصل مشترکی نیز مشاهده نمی‌شوند که نشانگر پیوند خوب بین SiC و زمینه آلومینیمی در ناحیه مرکزی است. همچنین کریستالهای آلومینیمی ریز (در حد زیر میکرومتر) در فصل مشترک مشاهده می‌شوند. احتمال دارد که چنین دانه های کوچکی در اثر سیلان شدید و تبلور مجدد در اطراف ذرات SiC یا انجماد سریع آلومینیم مذاب از سطح آنها شکل گرفته باشند.

### نتیجه گیری

- ۱- بیشترین دانسیته با استفاده از ضخامت اولیه ماده منفجره ۱۰/۵ میلی‌متری بدست آید.
- ۲- دو گونه توزیع ذرات SiC در زمینه آلومینیمی مشاهده شدند: ناحیه میانی که ذرات SiC بطور یکنواخت در زمینه آلومینیمی توزیع شده بودند و ناحیه کناری که ذرات عموماً در اطراف ذرات آلومینیمی متمرکز بودند.

### مراجع

- 1 - Noguchi, M. and Takahashi, K. (1997). *Key Eng. Mater.*, Vol. 127-131, PP. 153.
- 2 - Rühle, M. and Evans, A. G. (1989). *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 107, PP. 187.
- 3 - Lee, J. C., Ahn, J. P., Shim, J. H. and Lee, H. I. (1999). *Scripta Materialia*, Vol. 41, No.8, PP. 895.
- 4 - Shi, Z., Lee, J. C., Zhang, D., Lee, H. I. and Wu, R. (2002). *Mater. Sci. and Eng. A*, Vol. 303, PP. 46.
- 5 - Siva Kumar, K. and Hokamoto, K. (2000). *J. Mater. Sci.*, Vol. 35, PP. 5823.
- 6 - Hokamoto, K., Tanaka, S. and Fujita, M. (2000). *Int. J. Impa. Eng.*, Vol. 24, PP. 631.
- 7 - Siva Kumar, K., Balakrishna Bhat, T and Ramakrishnan, P. (1999). *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 85, PP. 125.
- 8 - Siva Kumar, K., Raj, P. S., Bhat, T. B. and Hokamoto, K. (2001). *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 115, PP. 396.
- 9 - Alvarez, G., Gonzalez, A. C. and Cuyas, J. C. (1989). *Powder Metallurgy*, Vol. 32, No.1, PP. 53.
- 10 - Hokamoto, K., Izuma, T. and Fujita, M. (1993). *Metall. Trans.* Vol. 24A, PP. 2289.
- 11 - Raybould, D., Morris, D. G. and Cooper, G. A. (1979). *J. Mater. Sci.* Vol. 14, PP. 2523.
- 12 - Siva Kumar, K., Balakishna Bhat, T. and Ramakrishnan, P. (1996). *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 62, PP. 191.

- 13 - Prummer, R. (1989). *In explosive welding, forming and compaction*, T. Z. Blazynski(ed.), Applied science publishers, London, PP. 369.
- 14 - Staudhammer, K. P. and Johnson, K. A. (1996). *In Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena*, edited by L. E. Murr, K. P. Staudhammer and M. A. Meyers(Marcel Dekker, New York) PP. 149.
- 15 - Murr, L. E. (1986). *Metallurgical Applications of Shock Wave and High- Strain-Rate Phenomena* (Marcel Dekker, New York).
- 16 - Lee, J. C., Yoon, E. P. and Lee, H. I. (1997). *Mater. Res. Bull.*, Vol. 9, PP. 1155.
- 17 - Shin, D. S., Lee, J. C., Yoon, E. P. and Lee, H. I. (1997). *Mater. Res. Bull.*, Vol. 32, PP. 1155.
- 18 - Eskandari, H., Ghasemi, H.M. and Emamy, M. (2004). *Mat. Sci. Forum*, Vol. 465-466, PP. 213.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Scanning Electron Microscopy (SEM)
  - 2 - Transmission Electron Microscopy (TEM)
  - 3 - Aluminum Matrix Composite (AMC)
  - 4 - X-Ray Diffraction (XRD)
  - 5 - Ion milling
  - 6 - Softening
  - 7 - Explosive Pad Thickness (EPT)
-