

# تولید پودر کامپوزیتی آلومینیم ۲۰۲۴-گرافیت با روش از هم گسیختگی مذاب به کمک فاز جامد

آرمان زارع بیدکی<sup>۱</sup> و فرشاد اخلاقی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد- پردیس دانشکده‌های فنی- دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۶/۲۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۷/۲۰، تاریخ تصویب ۸۷/۸/۶)

## چکیده

در این تحقیق کامپوزیت‌های آلومینیم - گرافیت حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی گرافیت از طریق روش از هم گسیختگی مذاب به کمک فاز جامد واسطه (پودر گرافیت) و به دست آوردن مخلوط پودری آلومینیم-گرافیت و در نهایت فشرده‌سازی و سینترینگ پودر حاصل تولید شدند. جهت تعیین سیکل بهینه برای فراوری مخلوط پودری، چهار سیکل متفاوت درجه حرارت- زمان که در آن آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ در حالت مذاب و یا نیمه‌جامد-نیمه‌مایع به همراه پودر گرافیت همزده می‌شد، مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر هر یک از این سیکل‌ها بر توزیع اندازه ذرات پودری و درصد گرافیت بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که با بهینه‌سازی سیکل درجه‌حرارت- زمان می‌توان بازده تولید پودر را افزایش داده و زمان فرایند را کاهش داد. مخلوط پودری حاصل از این روش، محدوده وسیعی از اندازه ذرات داشته و در دانه‌بندی‌های درشت گرافیت به سطح ذرات پودری به صورت چسبیده و در دانه‌بندی‌های ریز گرافیت به صورت چسبیده و آزاد وجود دارد. ریزترین دانه‌بندی، مربوط به مخلوط پودری حاوی ۱۵ درصد وزنی گرافیت می‌باشد. مطالعات میکروسکوپ الکترونی بر سطح مقطع شکست نمونه‌ها، نشان داد که کامپوزیت‌های تولید شده از این روش، توزیع یکنواختی از ذرات گرافیت در زمینه دارند.

**واژه‌های کلیدی:** کامپوزیت آلومینیم گرافیت، سیکل‌های درجه حرارت زمان، تراکم، توزیع ذرات گرافیت

## مقدمه

متالورژی پودر پس از تهیه پودر آلومینیوم و گرافیت برای رسیدن به یک توزیع مناسب از گرافیت در زمینه، لازم است که این دو پودر برای مدت زمان طولانی با هم مخلوط شوند [۴]. یکی از موضوع‌های مهم در تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی و از جمله کامپوزیت‌های آلومینیم-گرافیت، به دست آوردن توزیع یکنواخت از ذرات سرامیکی (گرافیت) در زمینه آلیاژی است. در روش‌های ذوبی به دلیل اختلاف چگالی ذرات سرامیکی و مذاب، امکان ته‌نشین شدن و یا شناور شدن ذرات در مذاب وجود دارد که در مورد خاص کامپوزیت آلومینیم-گرافیت پدیده شناوری ذرات به وقوع پیوسته و سبب توزیع غیر یکنواخت ذرات در کامپوزیت نهایی می‌شود [۵]. همچنین رانده شدن ذرات توسط جبهه انجماد نیز می‌تواند مزید بر علت شده و باعث توزیع غیریکنواخت ذرات سرامیکی در زمینه شود [۱۳]. در روش‌های متالورژی پودر نیز اختلاف چگالی پودر زمینه و پودر سرامیکی، سبب توزیع غیر یکنواخت این دو پودر در یکدیگر شده که زمان‌های نسبتاً طولانی (بیش از ۱۲ ساعت) را برای انجام عملیات

کامپوزیت‌های آلومینیم-گرافیت به دلیل عدم نیاز به روانکاری مداوم، ضریب اصطکاک و نرخ سایش پایین، خواص ضد قفل شونده، خواص مکانیکی مناسب و دانسیته پایین، ظرفیت بالایی برای کاربردهای صنعتی از جمله صنایع خودروسازی دارند [۱۲]. این کامپوزیت‌ها، اغلب از روش‌های ذوبی و یا متالورژی پودر تولید می‌شوند. در روش‌های ذوبی به دلیل ترشوندگی ضعیف گرافیت به وسیله مذاب آلومینیم، استفاده از تکنیک‌های پیچیده و گران‌قیمت پوشش‌دهی گرافیت با مس یا نیکل ضروری و کسر حجمی محدودی از ذرات گرافیت را می‌توان اضافه کرد. در ضمن، رسیدن به یک توزیع یکنواخت از گرافیت در زمینه مشکل است [۳]. در روش متالورژی پودر، اگر چه بسیاری از محدودیت‌های روش ذوبی وجود ندارد، ولی به علت محدودیت در بازار تولید، معمولاً فقط پودر آلیاژی با اندازه و ترکیب خاص یافت می‌شود. در ضمن انبار کردن پودر آلومینیوم به دلیل قابلیت احتراق، آن مشکل بوده و فراهم کردن امکانات حفاظتی لازم برای جلوگیری از احتراق سبب افزایش هزینه تولید می‌شود. در روش سنتی

(±۱) نشان داده شده در شکل (۲) توسط همزن گرافیتی با سرعت ۴۰۰ دور بر دقیقه هم زده شد. در سیکل I (شکل ۲) بعد از ذوب شدن آلومینیم و رسیدن به ۱۱۲°C فوق‌گاز گرافیت به مذاب اضافه شده و عمل هم زدن مخلوط مذاب و گرافیت در دمای ۷۵۰°C به مدت ۵ دقیقه انجام گرفته است. سپس فرایند هم زدن در داخل کوره تا رسیدن دمای مخلوط به ۶۳۰°C (در دامنه انجمادی آلیاژ) ادامه یافته است. سپس مخلوط در این شرایط به مدت ۱۰ دقیقه هم‌زده شده و بار دیگر دما تا بالاتر از نقطه ذوب آلیاژ افزایش یافته و فرایند هم زدن به مدت ۳۰ دقیقه در این دما انجام گرفته است. در نهایت مخلوط حاصل تخلیه شده است. در سیکل II بعد از اضافه کردن گرافیت به مذاب در دمای ۷۵۰°C مخلوط در این دما به مدت ۵ دقیقه هم زده شده است، سپس در ضمن هم زدن مخلوط در داخل کوره، دمای مخلوط پودری تا ۶۱۱°C کاهش یافته و سپس مخلوط تخلیه می‌شود. در سیکل‌های III و IV مشابه با سیکل‌های I و II بعد از اضافه کردن گرافیت به آلومینیم مذاب در دمای ۷۵۰°C، مخلوط به مدت ۵ دقیقه در این دما هم زده می‌شود. در سیکل III فرایند هم‌زدن تا رسیدن به دمای ۶۳۰°C که در آن کسر فاز مذاب ۰/۷ [۹] است، ادامه یافته و سپس مخلوط تخلیه شده است، ولی در سیکل IV بعد از هم زدن مخلوط در دمای ۷۵۰°C بوته از کوره خارج و فرایند هم زدن مخلوط در دمای محیط انجام گرفته و بعد از رسیدن به دمای ۶۳۰°C مخلوط حاصل تخلیه می‌شود. مخلوط پودری حاصل داخل یک ظرف فولادی تخلیه شده و توسط سردن لوزان به مدت ۲۰ دقیقه سردن و درصد وزنی پودر در محدوده‌های مختلف از اندازه ذرات محاسبه شد. همچنین درصد گرافیت در دانه‌بندی‌های مختلف با روش انحلال شیمیایی توسط اسید کلریدریک ۳۶ درصد اندازه‌گیری شد [۸]. با توجه به درصد پودر و درصد گرافیت در هر محدوده از اندازه ذرات (در پودرهای تولید شده با سیکل‌های مختلف) سیکل بهینه برای تولید مخلوط پودری انتخاب شد.

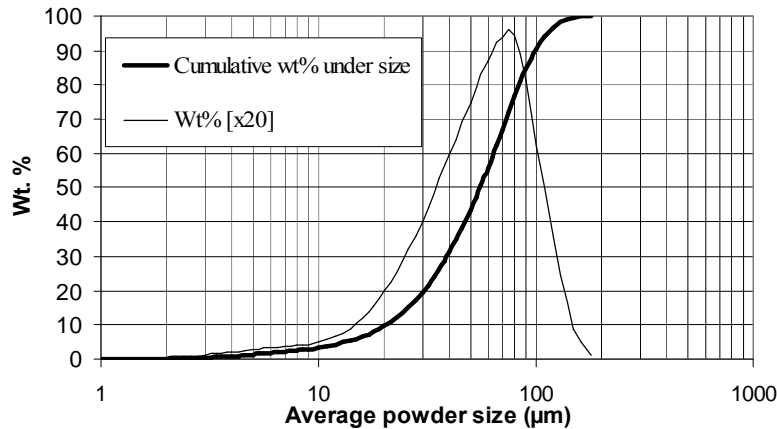
جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلومینیم ۲۰۲۴ (درصد وزنی).

Si	Fe	Mg	Cu	Al
۰/۲۳	۰/۲۷	۱/۷۴	۴/۶۴	بقیه

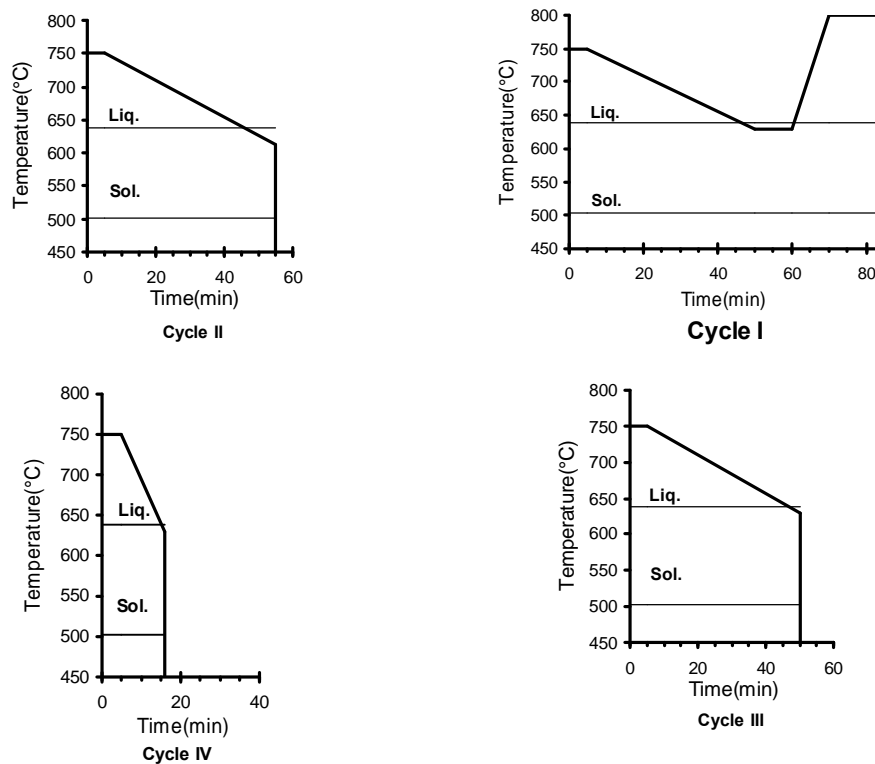
مخلوط‌سازی ضروری می‌کند [۱]. در تحقیق حاضر از یک روش جدید با نام متالورژی پودر درجا که برای اولین بار در دانشکده مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه تهران ابداع شده، برای تولید مخلوط پودری  $Al_{20}Zr_{24}/Gr$  استفاده شده است [۶]. در این روش، عمل از هم‌گسیختگی مذاب و تبدیل آن به قطره‌های فلزی، توسط یک پودر سرامیکی واسطه انجام می‌شود [۷] که به روش از هم‌گسیختگی مذاب به کمک فاز جامد موسوم است. در این روش مخلوط پودری آلومینیم-گرافیت به طور مستقیم در اثر هم زدن گرافیت و آلیاژ آلومینیم (در حالت مذاب یا نیمه جامد-نیمه مایع) حاصل می‌شود که در آن ذرات گرافیت به صورت چسبیده شده به ذرات نسبتاً درشت آلومینیم قرار می‌گیرند و در محدوده‌های ریزتر از اندازه ذرات، ورقه‌های گرافیت به طور آزاد، توزیعی نسبتاً یکنواخت را در پودر آلومینیم نشان می‌دهند. هدف از این تحقیق، کامل شدن تحقیقات قبلی است که در مورد آلیاژ ریخته-گری  $Al(A_{35}E_6)$  انجام شده بود [۶]. برای این هدف از آلیاژ کار شده آلومینیم ۲۰۲۴ با دامنه انجمادی وسیع تر استفاده شده و با تغییر سیکل‌های درجه حرارت-زمان (با دقت دمای اندازه‌گیری ±۲)، مطالعاتی برای کوتاه کردن مدت زمان تولید و افزایش بازده تولید پودر انجام شده است. نمونه‌های پودری، حاوی درصد‌های مختلف گرافیت در فشارهای مختلف متراکم و سینتر شدند [۷]. توزیع گرافیت در سطح مقطع شکست نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش تحقیق

حدود ۴۰۰ گرم آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴ (به صورت میلگرد) با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول ۱ با دمای لیکوئیدوس ۶۳۸°C و دمای سالیدوس ۵۰۲°C داخل یک بوته گرافیتی ۳ کیلوگرمی ذوب شده و پس از رسیدن به ۱۱۰°C فوق‌گاز، ۱۵ درصد وزنی پودر گرافیت ورقه‌ای با متوسط اندازه ذرات ۵۵ میکرومتر و ماکزیمم اندازه ذرات ۱۶۰ میکرومتر به مذاب اضافه شد. منحنی توزیع ذرات گرافیت مورد استفاده توسط دستگاه آنالیز اندازه ذرات به کمک اشعه لیزر اندازه‌گیری شده در شکل (۱) آورده شده است. سپس مخلوط حاصل مطابق با یکی از سیکل‌های درجه حرارت-زمان (با دقت دمای اندازه‌گیری



شکل ۱: توزیع اندازه ذرات پودر گرافیت مورد استفاده.



شکل ۲: سیکل های مورد استفاده جهت تولید مخلوط پودری.

SEM قرار گرفتند. نمونه‌های حاوی ۵ درصد گرافیت زیر فشار ۶۵۰ Mpa و سایر نمونه‌ها زیر فشار ۵۹۴ Mpa توسط یک قالب فولادی (فولاد گرم کار DIN ۱/۲۳۴۴) به صورت یک طرفه با سرعت ۳۰۰ mm/min پرس شدند. سپس نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی گرافیت در دمای ۶۰۰°C به مدت ۳۰ دقیقه و نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد وزنی گرافیت در دمای ۶۱۰°C به مدت ۶۰ دقیقه زیر آتمسفر نیتروژن توسط کوره لوله‌ای سینتر شدند [۷]. برای بررسی چگونگی توزیع گرافیت، سطح مقطع شکست

با استفاده از سیکل بهینه (سیکل IV) مخلوط های پودری حاوی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی گرافیت تهیه شدند. پودرهای حاصله، سرد شده و از پودر با اندازه کوچکتر از ۵۰ میکرومتر برای تعیین توزیع اندازه ذرات توسط دستگاه LPSA<sup>۱</sup> نمونه برداری شد. درصد وزنی گرافیت در مخلوط های پودری حاصله و همچنین در محدوده‌های مختلف دانه‌بندی با روش انحلال شیمیایی توسط اسید کلریدریک ۳۶ درصد اندازه‌گیری شد. برای مطالعه توزیع گرافیت، مخلوط های پودری زیر مطالعات

نمونه‌ها توسط میکروسکوپ SEM بررسی شدند.

## نتایج و بحث

در اثر هم زدن آلومینیوم در حالت مذاب یا در حالت نیمه‌جامد - نیمه‌مایع به همراه ذرات گرافیت به دلیل عدم ترشوندگی این ذرات توسط مذاب [۱۳] و با نیروی برشی ایجاد شده توسط همزن گرافیتی، مذاب به قطره‌هایی تبدیل می‌شود که در میان توده‌ای از پودر گرافیت پراکنده شده و امکان به هم پیوستن آنها به حداقل می‌رسد. پس از سرد کردن، مخلوط پودری آلومینیم و گرافیت تولید می‌شود [۶]. تبدیل توده مذاب به قطره‌های مذاب در حالت مذاب انجام می‌گیرد و در حالت نیمه‌جامد - نیمه‌مایع نیز وجود ذرات جامد فلزی به فرایند از هم گسیختگی مذاب کمک می‌کند [۶]. آنالیز سرند مخلوط‌های پودری حاصل در جدول (۲) آورده شده است. در سیکل I (شکل ۲) در فاصله زمانی بین قطع عمل هم زدن و خروج بوته از کوره به نبود نیروی برشی و بالا بودن دما (بالتر از نقطه ذوب آلیاژ) بخشی از قطره‌های تشکیل شده به هم متصل شده و یک حوضچه مذاب را در ته بوته ایجاد می‌کنند که در هنگام تخلیه بوته، این حوضچه باقی می‌ماند و هنگام انجماد به کلوخه تبدیل می‌شود که در محصول پودری این سیکل (جدول ۲) مشهود است. زمان کل فرایند در این سیکل ۹۰ دقیقه است. در سیکل II با توجه به این که دمای تخلیه مخلوط پودری  $611^{\circ}\text{C}$  است، به دلیل پایین بودن نسبی کسر فاز مذاب  $(0/3)$  [۹] حوضچه مذاب تشکیل نمی‌شود، بنابراین در این سیکل کلوخه ایجاد نشده و زمان کل فرایند در این سیکل به ۵۵ دقیقه کاهش می‌یابد. در سیکل‌های III و IV نیز کلوخه تشکیل نمی‌شود و میزان پودر ریز (کوچک‌تر از ۵۰۰ میکرومتر) نیز در مقایسه با سیکل‌های I و II بیشتر است. از طرفی همان گونه که مشاهده می‌شود در سیکل IV زمان فرایند به ۱۵ دقیقه تقلیل یافته است. بنابراین سیکل IV، نسبت به سیکل‌های دیگر برتری دارد. با توجه به بالاتر بودن سرعت سرد شدن ذرات، فرصت کمتری برای به هم پیوستن و ایجاد دانه‌های درشت داشته و بنابراین مخلوط پودری این سیکل نیز ریزتر است. درصد گرافیت در دانه‌بندی‌های مختلف بر مبنای وزن پودر به دست آمده در هر دانه‌بندی برای پودرهای تولیدی توسط سیکل‌های I، II، III و IV که از راه انحلال شیمیایی به

دست آمده، در جدول (۳) آورده شده است. به طوری که ملاحظه می‌شود درصد گرافیت در دانه‌بندی‌های مختلف پودر متفاوت است. در ضمن حتی برای یک دانه‌بندی معین نیز که از سیکل‌های مختلف تولید شده، درصد‌های مختلف گرافیت حاصل شده است. دلیل این موضوع طبیعت ترد و شکننده ذرات پولکی شکل گرافیت است که بسته به مدت زمان اعمال نیروهای برشی و درجه حرارت مورد استفاده در حین اعمال برش (که در آن آلیاژ فلزی می‌تواند به صورت مایع و یا نیمه‌جامد باشد)، نیروهای مکانیکی متفاوتی به ذرات اعمال می‌شود که در طی آن ذرات گرافیت شکسته می‌شوند و با توجه به میزان شکسته شدن، در دانه‌بندی‌های مختلف در مخلوط پودری حضور می‌یابند. همچنین مشاهده می‌شود که درصد گرافیت در سیکل IV و در دانه‌بندی‌های درشت بیشتر از سیکل‌های دیگر می‌باشد. علت این موضوع کوتاه‌تر بودن زمان هم زدن مخلوط در سیکل مذکور نسبت به سایر سیکل‌ها است به طوری که به واسطه کوتاه‌تر بودن این زمان میزان برخورد ذرات به یکدیگر و شکسته شدن و کنده شدن گرافیت چسبیده به سطح ذرات کاهش می‌یابد. بنابراین با مقایسه سیکل‌های چهارگانه با یکدیگر مشاهده می‌شود که سیکل IV از نظر تولید پودر با دانه‌بندی ریزتر، حضور بیشتر گرافیت در دانه‌بندی‌های درشت که خود باعث توزیع یکنواخت‌تر گرافیت در کامپوزیت نهایی می‌شود و نیز زمان کل فرایند، سیکل بهینه است.

تصاویر SEM از مخلوط‌های پودری با اندازه‌های مختلف در بزرگ‌نمایی‌های مختلف در شکل‌های (۳) تا (۵) نشان داده شده‌اند. به طوری که ملاحظه می‌شود مورفولوژی پودرهای آلومینیم تولید شده مطابق استاندارد ISO3252 به صورت نامنظم است. البته پودرهای درشت‌تر تا حدودی شکل نزدیک به کره دارند. همچنین در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که در برخی از دانه‌بندی‌ها ذرات گرافیت به پودرهای آلومینیمی چسبیده‌اند و در برخی دانه‌بندی‌ها گرافیت به طور مجزا (آزاد) نیز وجود دارد. با توجه به اینکه حداکثر اندازه ذرات پودر گرافیت مورد استفاده ۱۶۰ میکرومتر است (شکل ۱) بنابراین در محدوده‌های دانه‌بندی بزرگ‌تر از ۱۶۰ میکرومتر گرافیت موجود به سطح ذرات آلومینیم چسبیده است (شکل b-۳) که این موضوع می‌تواند باعث توزیع یکنواخت‌تر ذرات گرافیت در کامپوزیت نهایی بشود. در محدوده‌های

در شکل (۶) تغییرات توزیع اندازه ذرات در مخلوط پودری که با استفاده از سیکل IV و با درصدهای مختلف گرافیت تولید شده‌اند، بر حسب درصد وزنی گرافیت نشان داده شده است. به طوری که مشاهده می‌شود با افزایش درصد گرافیت تا ۱۵ درصد اندازه ذرات کاهش می‌یابد، ولی با افزایش بیشتر درصد گرافیت، اندازه میانه افزایش می‌یابد. بنابراین حداقل مقدار اندازه میانه در نمونه حاوی ۱۵ درصد گرافیت حاصل می‌شود. در این فرایند ذرات گرافیت به عنوان عامل از هم گسیختگی مذاب عمل می‌کنند و چنانچه مقدار گرافیت بیشتر از یک حد بهینه باشد مقداری از انرژی حاصل از چرخش هم‌زن به جای اینکه صرف از هم گسیختگی مذاب و ریزتر کردن قطره‌های فلزی شود، در جریان برخورد ذرات گرافیت با یکدیگر تلف می‌شود. این موضوع سبب عدم انتقال بهینه انرژی به مذاب فلزی و در نتیجه درشت‌تر شدن ذرات پودری می‌شود. پس این نتیجه حاصل می‌شود که مقدار بهینه درصد گرافیت از نظر حصول حداکثر راندمان انرژی مصرفی در شرایط تحقیق حاضر ۱۵ درصد وزنی است.

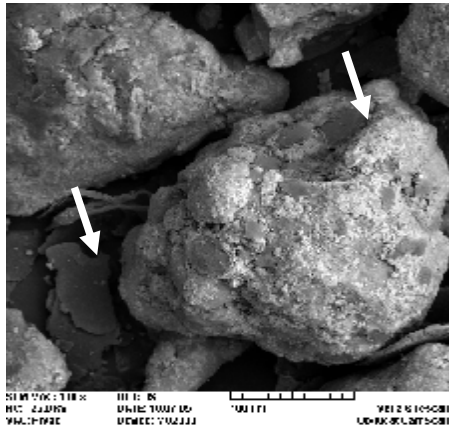
دانه‌بندی کوچک‌تر گرافیت می‌تواند به طور آزاد و چسبیده به ذرات آلومینیم باشد. در شکل‌های (۳-الف) و (۴-الف) و (۵-الف) مخلوط پودری آلومینیم به همراه گرافیت آزاد مشاهده می‌شود. همچنین در شکل‌های (۳-ب) و (۴-ب) و (۵-ب) وجود گرافیت به صورت چسبیده به ذرات آلومینیم نشان داده شده است. با توجه به تحقیقات انجام شده [۶]، حداقل زمان لازم برای حصول ترشوندگی بین آلومینوم و گرافیت در دمای  $۸۲۵^{\circ}\text{C}$ ، حدود ۱۰۰ دقیقه است بنابراین روشن است که در هیچ یک از سیکل‌های مطالعه شده در تحقیق حاضر ترشوندگی حاصل نشده است پس با توجه به تصاویر SEM، به نظر می‌رسد علت چسبیده شدن ورقه‌های گرافیت به ذرات پودر آلومینیم، قفل شدن مکانیکی در اثر انقباض حین انجماد قطرات آلومینیمی می‌باشد که باعث به دام افتادن مکانیکی ورقه‌های گرافیت در بین پستی و بلندی‌های ایجاد شده در سطح قطره‌های آلومینیم می‌شود.

جدول ۲: درصد وزنی پودر در محدوده‌های دانه بندی مختلف.

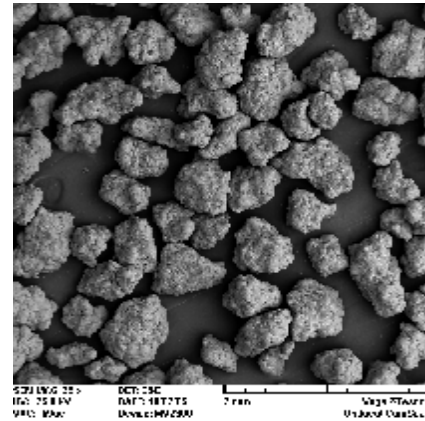
محدوده دانه‌بندی ( $\mu\text{m}$ )	Cycle I	Cycle II	Cycle III	Cycle IV
کلوخه	۳۴/۳۳	-	-	-
۷۱۰-۸۱۰	۲۳/۰۵	۱۵/۳۲	۱۴/۳۷	۱/۴۸
۵۰۰-۷۱۰	۵/۰۶	۲۱/۸۳	۲۰/۱۷	۱۸/۴۳
۳۰۰-۵۰۰	۷/۳۰	۱۶/۰۹	۱۸/۵۷	۳۶/۶۵
۲۱۲-۳۰۰	۴/۷۲	۴/۰۷	۵/۰۹	۱۴/۱۴
۱۵۰-۲۱۲	۴/۲۶	۲/۳۳	۳/۹۵	۶/۶۹
۱۰۶-۱۵۰	۵/۰۶	۲/۵۶	۳/۹۵	۳/۸۹
۶۳-۱۰۶	۷/۱۵	۸/۹۲	۷/۵۶	۶/۳۷
۴۵-۶۳	۶/۷۴	۱۲/۵۴	۱۲/۹۱	۶/۳۳
۳۸-۴۵	۱/۵۳	۱۰/۸۰	۹/۱۶	۳/۰۹
<۳۸	۰/۷۹	۵/۴۸	۴/۳۶	۲/۹۳

جدول ۳: درصد وزنی گرافیت در محدوده‌های مختلف دانه‌بندی پودرهای تولیدی توسط سیکل‌های مختلف.

محدوده دانه‌بندی ( $\mu\text{m}$ )	Cycle I	Cycle II	Cycle III	Cycle IV
>۷۱۰	۴/۸	۵/۸	۵/۱۴	۱۲/۱۴
۵۰۰-۷۱۰	۶/۷	۷/۴۷	۸/۸	۹/۴۷
۳۰۰-۵۰۰	۷/۱۵	۷/۱۴	۶/۱۴	۷/۸۰
۲۱۲-۳۰۰	۹/۳۶	۸/۸۰	۹/۸	۱۰/۸۰
۱۵۰-۲۱۲	۹/۷۲	۶/۴۷	۹/۱۴	۹/۸
۱۰۶-۱۵۰	۱۲/۷۹	۹/۱۴	۱۹/۱۴	۱۱/۱۴
۶۳-۱۰۶	۴۸/۴۶	۳۹/۴۷	۴۰/۴۷	۴۷/۳۴
۴۵-۶۳	۵۲/۳۹	۳۱/۱۴	۲۸/۴۷	۴۵/۸۰
۳۸-۴۵	۴۸/۲۶	۲۷/۸۰	۲۷/۴۷	۳۹/۱۴
<۳۸	۴۵/۴۹	۲۲/۸۰	۲۲/۴۵	۲۱/۸۰

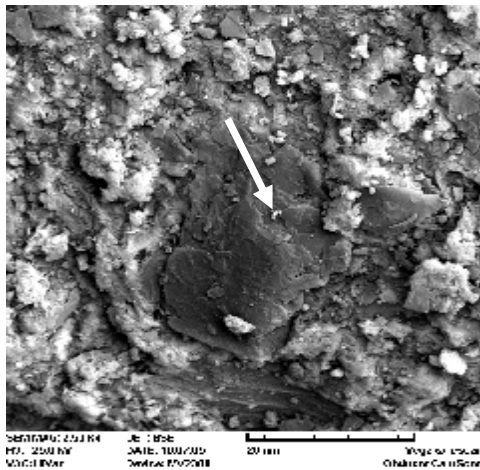


(ب)

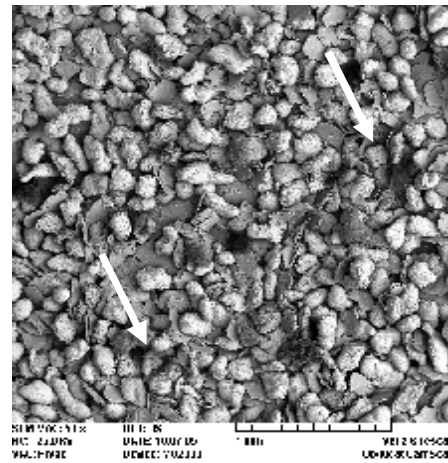


(الف)

شکل ۳: تصاویر SEM مخلوط پودری با اندازه ذرات ۳۰۰-۵۰۰ میکرون تولید شده با سیکل IV الف) بزرگ نمایی ۳۵x (ب) بزرگ نمایی ۴۰۰x بیانگر چسبیده بودن گرافیت به آلومینیم

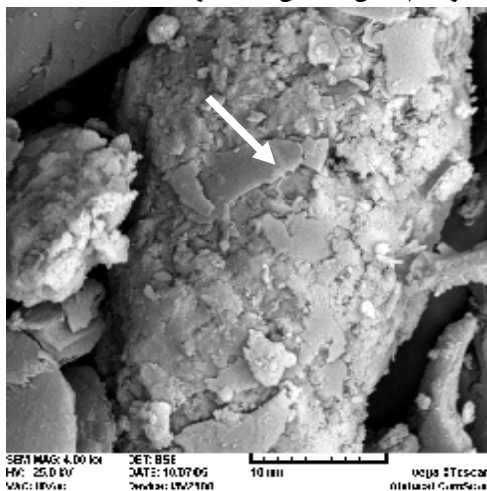


(ب)

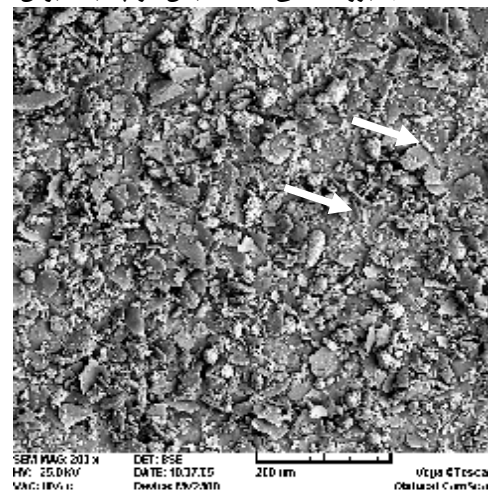


(الف)

شکل ۴: تصاویر SEM مخلوط پودری با اندازه ذرات ۱۵۰-۱۰۶ میکرون تولید شده با سیکل IV a) بزرگ نمایی ۵۰x (b) بزرگ نمایی ۲.۵ kx بیان گر چسبیده بودن گرافیت به آلومینیم. فلش ها نشان دهنده گرافیت هستند.

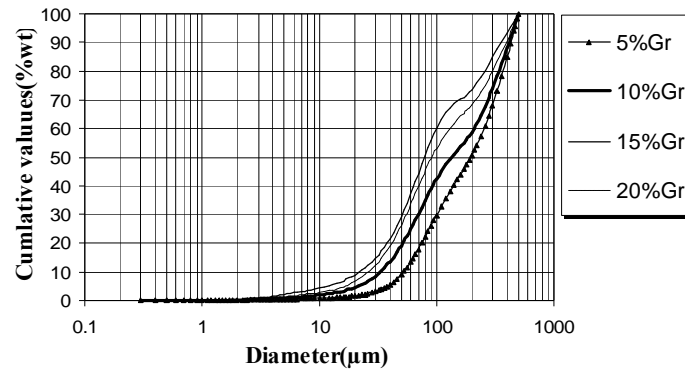


(ب)

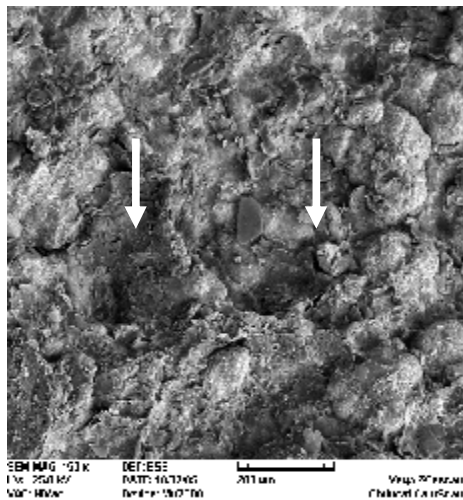


(الف)

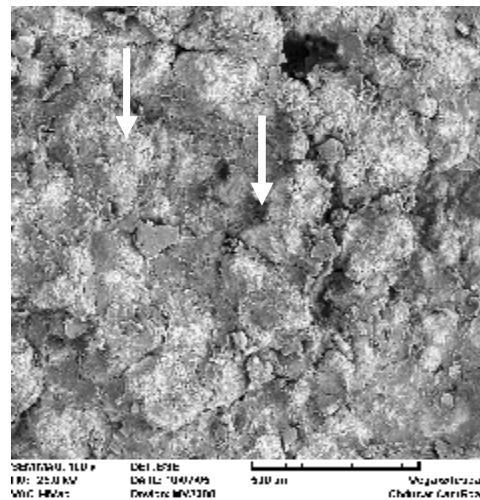
شکل ۵: تصاویر SEM مخلوط پودری با اندازه ذرات کوچکتر از ۳۸ میکرون تولید شده با سیکل IV a) بزرگ نمایی ۲۰۰x (b) بزرگ نمایی ۴ kx بیانگر چسبیده بودن گرافیت به آلومینیم. فلش ها نشان دهنده گرافیت هستند.



شکل ۶: منحنی توزیع اندازه ذرات در مخلوط های پودری حاوی مقادیر مختلف گرافیت.



(ب)



(ف)

شکل ۷: تصویر SEM از سطح مقطع شکست (الف) نمونه حاوی ۱۰ درصد گرافیت (ب) نمونه حاوی ۱۵ درصد گرافیت. فلش ها نشان دهنده گرافیت هستند.

۲- دانه بندی مخلوط های پودری  $Al_2O_3/Gr$  با درصد های مختلف گرافیت که با استفاده از روش متالورژی پودر درجا تولید می شوند وسیع و در محدوده  $710 >$  تا  $38 <$  میکرون است که این موضوع تأثیر بسزایی در رفتار تراکم پذیری این مخلوط ها دارد.

۳- توزیع اندازه ذرات در مخلوط پودری حاصل از این فرایند، وابسته به درصد گرافیت اضافه شده است و ریزترین دانه بندی در مخلوط های پودری حاوی درصد های وزنی مختلف گرافیت در نمونه حاوی ۱۵ درصد گرافیت حاصل می شود. در ضمن، درصد گرافیت در دانه بندی های مختلف متفاوت بوده و تحت تأثیر سیکل تولید می باشد.

در شکل (۷) تصاویر SEM از سطح مقطع شکست نمونه های کامپوزیتی با درصد های مختلف گرافیت پس از عملیات فشرده سازی و سینترینگ مخلوط های پودری حاصل از سیکل IV [۷] نشان داده شده است همان گونه که مشاهده می شود توزیع گرافیت در داخل نمونه های کامپوزیتی یکنواخت است.

### نتیجه گیری

۱- روش متالورژی پودر درجا، قادر به تولید مخلوط پودری آلومینیم  $20\%Gr$  و گرافیت است. با انتخاب سیکل مناسب دما-زمان در این فرایند می توان در مدت زمان نسبتاً کوتاه (۱۵ دقیقه) به ماکزیمم راندمان تولید رسید.

آلومینیم وجود دارند، ولی در اندازه‌های بزرگ‌تر، ذرات گرافیت فقط به صورت چسبیده ظاهر می‌شوند.  
۶- توزیع گرافیت در نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده با این روش یکنواخت است.

۴- مورفولوژی ذرات پودر آلومینیم تولید شده با روش حاضر به صورت نامنظم است که این موضوع نیز در تراکم پذیری مناسب این پودر مؤثر است.  
۵- در تمام نمونه‌های پودری حاوی درصد‌های مختلف گرافیت و در دانه‌بندی‌های کوچک‌تر از ۱۶۰ میکرون ذرات گرافیت به صورت آزاد و یا چسبیده به ذرات پودر

## مراجع

- 1 - Lin, J. F., Shih, M. G. and Chen, Y. W. (1996). "The tribological performance of 6061 aluminium materials in oil lubricants with EP additives." *Wear*, Vol. 198, PP. 58-70.
- 2 - Jha, K., Prasad. S. V. and Upadhyaya, G. S. (1989). "Technical note: Preparation and Properties of 6061 aluminium alloy/graphite composites by PM route." *Powder Metallurgy*, Vol. 32, PP. 309-312.
- 3 - Ibrahim, I. A., Mohamed, F. A. and Lavernia, E. J. (1991). "Particulate reinforced metal matrix composites-a review." *Journal of Materials Science*, Vol. 26, PP. 1137-1156.
- 4 - Park, K. and Lucas, J. P. (1997) "Moisture effect on SiCp/6061 Al MMC: Dissolution of interfacial Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>." *Scripta Metallurgica*, Vo. 137, PP. 511-516.
- 5 - Rohatgi, P. K., Dan, T. K., Parasad, Das, S. V. Gupta, S. A. K. Parasad, B. K. and Zho, A. K. (1998). "Process for the manufacture of aluminium-graphite composite for automobile and engineering applications." *US patent* Vol. 4, 946, 647.
- 6 - Akhlaghi, F. and Pelaseyyed, S. A. (2004). "Characterisation of aluminium/graphite particulate composites synthesized using a novel method termed,"in-situ powder metallurgy." *Mater Sci and Eng*, Vol. A385, PP. 256-266.
- 7 - Zare-bidaki, A. and Akhlaghi, F. (2006). *An investigation on the Compressability and Sintering Behaviour of Al (2024)/Gr Composites Produced by In-situ Powder Metallurgy*. 3<sup>rd</sup>. Con. on Matform, tehran,iran.
- 8 - Prasad, B. K. and Dan, T. K. (1990). "Microstructure- and property - related changes in a pressure-die-cast graphitic aluminum-silicon alloy induced by heat treatment." *J. of Mater Sci Letters*, Vol. 9, PP. 951-952.
- 9 - Zimas, T. and Zavaliangos, A. (1999). "Materials selection for semisolid processing." *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 14, PP. 155-161.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1- Laser Particle Size Analyzer