ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(02):133-142

Investigation of the Effect of Mechanical Milling and Alloying Parameters for the Preparation of Al-6063SiC Composite Powder from Al6063 Alloy Chips

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Fekri Dolatabad P. [1]
Pouyafar V. [1]
Meshkabadi R. [2*]

How to cite this article
Fekri Dolatabad P, Pouyafar V, Meshkabadi R. Investigation of the Effect of Mechanical Milling and Alloying Parameters for the Preparation of Al-6063SiC Composite Powder from Al6063 Alloy Chips.; Engineering. 2022; 22(02):133-142.

[1] Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
[2] Department of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Correspondence
Address: Department of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
Phone: -
Fax: -
r_meshkabadi@uma.ac.ir

Article History
Received: July 31, 2021
Accepted: September 19, 2021
ePublished: December 25, 2022

ABSTRACT

The defectless microstructure of metal matrix composites, the uniform distribution of particles, and their good properties are determined by the production parameters and their material. In this study, Al6063-SiC composite powder was fabricated by a high-energy planetary ball mill. Aluminum chips were milled at different times and ball to powder weight ratio (BPR) in a high-energy planetary ball mill. The resulting powder was mechanically alloyed by adding different weight percentages of silicon carbide (SiC) under different BPRs and times. During the milling process under argon atmosphere, stearic acid was used as a process control agent (PCA) to prevent excessive cold welding and powder agglomeration. After mechanical alloying, the effect of alloying time, BPR, and weight percentage of silicon carbide on the powder morphology were studied by particle size analysis (PSA), field emission scanning electron microscope (FESEM), and the fuzzy compounds were analyzed by X-ray diffraction (XRD). According to the X-ray diffraction patterns, the grain size was calculated using the Williamson-Hall model. The results of mechanical milling and alloying have shown that in short milling times with high BPRs, composite powder with finer particle size could be achieved. Also, the presence of reinforcement particles accelerates the process of mechanical alloying and further reduces the particle size.

Keywords Metal-Matrix Composites, Mechanical Milling, Mechanical Alloying, Al6063-SiC Composite.

CITATION LINKS

[1] An experimental investigation of energy absorption in GLARE fiber metal laminates ... [2] Manufacturing of metal matrix composites: A state of review. [3] In situ synthesis of nanocrystalline Al6063 matrix nanocomposite powder ... [4] Effect of volume fraction of reinforcement and milling time on physical and mechanical ... [5] On the mechanical properties of hybrid aluminium 7075 matrix composite material ... [6] Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical ... [7] In situ synthesis of a gamma-Al2O3 whisker reinforced aluminium matrix composite ... [8] Fabrication of aluminum–carbon nanotube composites and their electrical properties. [9] Combination of hot extrusion and spark plasma sintering for producing carbon nanotube reinforced aluminum ... [10] Composites Part A: Appl. Sci. [11] Carbon nanotube reinforced aluminum composite fabricated by semi-solid powder processing. [12] Mechanically alloyed nanocomposites. [13] Structural and magnetic properties of Co/Al2O3 cermet synthesized by mechanical ball milling. [14] Influence of milling time on the crystallite size of AlSi5Cu2/SiC composite powder. [15] mechanical and wear characterization of silicon carbide reinforced Aluminium 7075 metal matrix composite. [16] Production and Characterization of Al-SiC Composites by Mechanical Milling. [17] Study of Al 2017 alloy prepared by recycling method via powder metallurgy route. [18] A novel method for the production of metal powders without conventional atomization process. [19] The Bragg equation derived. [20] Impact of silver doping on the crystalline size and intrinsic strain of MPA-capped CdTe nanocrystals... [21] Processing of advanced materials using high-energy mechanical milling. [22] The mechanism of mechanical alloying. [23] Mechanical alloying and milling. [24] Effect of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties ... [25] Fabrication and characterization of Al6063/SiC composites.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی تاثیر متغیرهای فرایند آسیای مکانیکی و آلیاژسازی مکانیکی به منظور تهیه پودر کامپوزیتی Al6063-SiC از براده‌های آلیاژ آلومینیوم Al6063

پریسا فکری دولت آباد
مهندسی مکانیک، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
وحید پویافر
مهندسی مکانیک، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
رامین مشک آبادی *
مهندسی مکانیک، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

چکیده

ریزساختار بدون نقص کامپوزیت‌های زمینه فلزی، توزیع یکنواخت ذرات و خواص خوب آن‌ها، توسط متغیرهای روش تولید و مواد زمینه و تقویت‌کننده تعیین می‌شود. در این تحقیق از آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای با انرژی بالا برای ساخت پودر کامپوزیتی Al6063-SiC استفاده شده است. براده‌های آلومینیوم با زمان و نسبت وزنی گلوله به پودر (BPR) مختلف در آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای با انرژی بالا آسیاکاری شدند. پودر بهینه حاصله، با افزودن درصدهای وزنی مختلف کاربید سیلسیم (SiC) با نسبت وزنی گلوله به پودر در زمان‌های مختلف، آلیاژسازی مکانیکی گردیدند. طی فرایند آسیاکاری تحت جو آرگون، از اسید استئاریک به عنوان عامل کنترل فرایند (PCA) برای جلوگیری از جوشکاری سرد بیش از حد و کلوخه‌ای شدن پودر استفاده شده است. پس از آلیاژسازی مکانیکی، تاثیر متغیرهای فرایند شامل زمان آلیاژسازی، نسبت وزنی گلوله به پودر و درصد وزنی کاربید سیلسیم با مقادیر مختلف بر روی پودر کامپوزیتی از نظر مورفولوژی توسط آنالیز اندازه ذرات (PSA) و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) و از نظر ترکیبات فازی توسط طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌ها، اندازه دانه از طریق مدل ویلیامسون-هال محاسبه گردید. نتایج حاصل از انجام فرایند آسیای مکانیکی و آلیاژسازی مکانیکی نشان داد که در زمان‌های آسیای کوتاه با نسبت وزنی گلوله به پودر بالا می‌توان به پودر کامپوزیتی با اندازه ذرات ریزتر دست یافت. همچنین وجود ذرات تقویت‌کننده کاربید سیلسیم موجب تسریع در فرایند آسیای مکانیکی شده و کاهش بیشتر اندازه ذرات را موجب می‌شود.

کلیدواژه‌ها: کامپوزیت‌های زمینه فلزی، آسیای مکانیکی براده‌ها، آلیاژسازی مکانیکی، کامپوزیت Al6063-SiC
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸
*نویسنده مسئول: r_meshkabadi@uma.ac.ir

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی دسته‌ای از مواد با زمینه فلزی هستند که با فازهای مختلفی از ذرات تقویت‌کننده همچون سرامیک‌ها ترکیب شده‌اند. خواص کامپوزیت‌ها توسط مواد زمینه، مواد تقویت‌کننده و روش تولید کنترل می‌شود. کامپوزیت‌های زمینه فلزی دارای مزایایی مانند نسبت مقاومت به وزن بالا، مدول الاستیسیته بالا، ضریب انبساط حرارتی پایین، مقاومت در برابر سایش و غیره نسبت به مواد معمولی هستند[1]. ریزساختار بدون نقص و توزیع همگن فاز تقویت‌کننده از موضوع‌های اصلی ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی است[2]. آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم عمدتاً به عنوان ماده زمینه در کامپوزیت‌های زمینه فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل چگالی کم، مقاومت در برابر خوردگی، رسانایی بالا و هزینه ساخت پایین، پرکاربردترین مواد در تحقیقات و صنعت هستند. از بین آلیاژهای آلومینیوم، آلیاژ Al6063 به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا دارای مزایایی مانند قابلیت جوش‌پذیری خوب، مقاومت در برابر خوردگی و مصونیت در برابر ترک خوردگی در برابر تنش ((Stress Cracking Corrosion (SCC) است[3].

کاربید سیلسیم (SiC)، آلومینا (Al_2O_3)، کاربید بور (B_4C)، کاربید تنگستن (WC)، گرافیت (Gr)، نانولوله‌های کربنی (CNT) و سیلیس (SiO_2) برخی از ذرات سرامیکی هستند که به عنوان فاز تقویت کننده در ساخت کامپوزیت‌ها مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. کاربید سیلسیم به دلیل خواصی مانند چگالی کم، استحکام بالا، انبساط حرارتی کم، رسانایی گرمایی بالا و همچنین عدم واکنش زیان‌آور در دمای بالا، گزینه مناسبی به عنوان فاز تقویت کننده است[4]. کامپوزیت‌های زمینه فلزی آلومینیوم که با کاربید سیلسیم تقویت شده‌اند، مقاومت و سختی خوبی نسبت به آلومینیوم دارند و بیشتر در صنایع هوا فضا، خودروسازی و صنایع الکترونیک مورد استفاده قرار می‌گیرند[5].

دستیابی به توزیع همگن فاز تقویت‌کننده در زمینه فلزی برای نشان دادن عملکرد برتر ماده مرکب الزامی است و هر چه تقویت‌کننده دارای پراکندگی یکنواخت بدون کلوخه‌ای شدن باشد منجر به کیفیت بهتر کامپوزیت می‌شود. فرآیندهای ساخت اثر مهمی بر پراکندگی یکنواخت فاز تقویتی وخواص مکانیکی مانند استحکام کششی، مقاومت در برابر ضربه، سختی، خستگی و همچنین مقرون به صرفه بودن دارند[6]. روش‌های مختلفی برای تولید کامپوزیت‌های زمینه فلزی آلومینیوم وجود دارند که می‌توان به روش‌هایی مانند تف‌جوشی[7]، اکستروژن گرم[8]، تف‌جوشی به کمک قوس پلاسما[9]، ریخته‌گری[10]، فرایند پودری نیمه جامد[11]و آلیاژسازی مکانیکی[12]در چند سال گذشته اشاره کرد. در روش‌های تولید مبتنی بر پودر، آلیاژسازی مکانیکی به طور گسترده‌ای برای دستیابی به توزیع یکنواخت ذرات در زمینه با موفقیت به کار گرفته شده است. فرایند آسیای مکانیکی-آلیاژسازی مکانیکی شامل قراردادن پودرهای ترکیبی اولیه یا آلیاژی در یک ظرف حاوی گلوله‌های فولادی، برای تغییر شکل شدید است. در تحقیقات اخیر اثر متغیرهایی مانند اندازه گلوله‌ها، نسبت وزنی گلوله به پودر، زمان آسیا و سرعت آن مورد بررسی قرار گرفته است تا شرایط بهینه برای بهبود خواص بررسی شود[13].

سوسنیاک و همکاران[14]، پودر کامپوزیت AlSi5Cu2/SiC را از روش آلیاژسازی مکانیکی براده‌های AlSi5Cu2 به همراه (۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی) پودرتقویت‌کننده کاربید سیلسیوم در آسیای

گلوله‌ای سیاره‌ای با گلوله‌های از جنس فولاد ضدزنگ با موفقیت تولید کردند. آنها نشان دادند که با افزایش زمان آلیاژسازی، اندازه دانه‌ها کاهش یافته و در عین حال کوچک‌تر از اندازه دانه‌های نمونه‌های بدون افزودن کاربید سیلسیوم می‌شوند. سوریا و همکاران[15]، خواص مکانیکی و تریبولوژی کامپوزیت Al7075- SiC ساخته‌شده با سه درصد وزنی مختلف (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) کاربید سیلسیم را مورد بررسی قرار دادند. بررسی ریزساختاری، پراکندگی یکنواخت ذرات کاربید سیلسیم و اتصال سطحی خوب بین زمینه و تقویت‌کننده را تأیید نمود و کامپوزیت تقویت‌شده با ۱۵ درصد وزنی کاربید سیلیسیوم خواص مکانیکی بهتری از خود نشان داد. شیمشک و همکاران[16]تأثیر مقدار کاربید سیلیسیوم و زمان آسیاکاری را بر ریزساختار، چگالی و سختی کامپوزیت‌های تولیدشده توسط آسیای مکانیکی را بررسی کردند. مشاهده شد که با افزایش مقدار کاربید سیلیسیوم و زمان آسیاکاری، اندازه پودرهای تولیدی کاهش یافته و مقادیر سختی آن افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار کاربید سیلیسیوم چگالی کامپوزیت‌های آلومینیومی افزایش یافت. دوانیان و همکاران[5]، خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم Al7075 تقویت‌شده با کاربید سیلیسیوم و کاربید تیتانیوم از طریق متالورژی پودر را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش میزان تقویت‌کننده‌ها، سختی ماده کامپوزیت افزایش می‌یابد.

در تحقیقات اخیر اثر متغیرهایی مانند اندازه گلوله‌ها، نسبت وزنی گلوله به پودر، زمان آسیا، سرعت آسیا و... به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است تا شرایط بهینه برای بهبود خواص ساختاری، مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی بررسی شود. اگرچه برخی از مطالعات از بهبود خواص مکانیکی خبر می‌دهند، کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده با ذرات سرامیکی با چالش‌های مختلفی روبرو هستند. پراکندگی یکنواخت فاز تقویتی از مهمترین نگرانی‌ها بوده است. در این تحقیق از آلیاژسازی مکانیکی (آسیای گلوله‌ای) به عنوان ابزاری موثر برای پراکندگی فاز تقویتی استفاده شده است. در این تحقیق از آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای انرژی بالا برای ساخت پودر کامپوزیتی Al6063- SiCاستفاده شده است. پس از آلیاژسازی مکانیکی، تاثیر متغیرهای فرایند شامل زمان آسیا، نسبت وزنی گلوله به پودر و درصد وزنی کاربید سیلسیم، با مقادیر مختلف بر روی پودر کامپوزیتی زمینه فلزی، از نظر مورفولوژی و ترکیبات فلزی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- بررسی اولیه براده‌های Al6063

در این تحقیق ابتدا شمش آلیاژ آلومینیومAl6063 توسط دستگاه فرز به براده‌هایی با متوسط اندازه ۲×٤ میلی‌متر ماشینکاری شدند. در شکل ۱ تصویر این براده‌ها نشان داده شده است. برای جلوگیری

شکل ۱) براده‌های ماشینکاری‌شده آلیاژ Al6063

از تولید حرارت و تاثیر آن بر ریزساختار براده‌ها، در حین ماشینکاری از آب‌صابون استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ توسط آزمون اسپکترومتری انجام شد و درصد وزنی عناصر موجود در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲- آسیای مکانیکی براده‌ها و بررسی فرایند آسیاکاری

تهیه‌ی پودر از براده‌های بازیافتی توسط متالوژی پودر روش تولیدی جدیدی است[17]. آسیای مکانیکی براده‌های شکل‌پذیر، متفاوت از حالتی است که از ذرات پودر به عنوان ماده‌ی اولیه استفاده می‌شود. روش تولید یکی از تفاوت‌های مهم بین براده و پودر است. اکثر پودرهای فلزی توسط روش انجماد سریع تولید می‌شوند؛ اما براده‌ها از فلزات تولیدشده به روش ریخته‌گری به دست می‌آیند. تفاوت‌های قابل توجهی بین خواص پودر و براده از قبیل ریزساختار، خواص فیزیکی و مکانیکی به علت تفاوت در روش تولید وجود دارد که در فرآیند آسیاکاری تأثیر می‌گذارند[18]. از آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای با انرژی بالا که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای انجام فرایند آسیای مکانیکی استفاده گردید. این آسیا دارای دو کاپ به حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر از جنس پلیمر سخت است و گلوله‌های داخل آن از جنس فولاد ضدزنگ می باشند. برای جلوگیری از اکسید شدن و آلودگی براده‌ها و پودرها حین آسیا از گاز آرگون استفاده شد. به منظور عدم چسبندگی پودرها به گلوله‌ها و به دیواره‌های آسیا و جلوگیری از جوش سرد در حین فرایند، از یک درصد وزنی اسید استئاریک به عنوان عامل کنترل فرایند

جدول ۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ Al6063

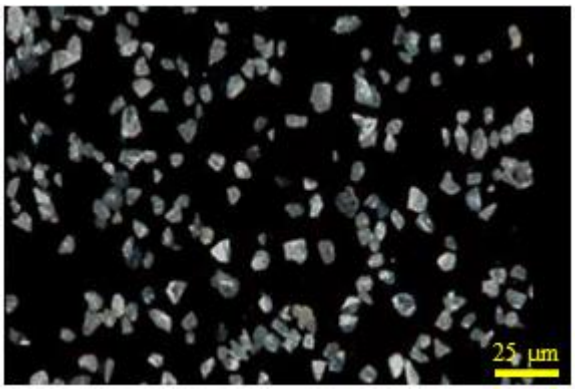
عناصر	درصد وزنی
آلومینیوم	۹۸/۱۵
روی	۰/۱
منیزیم	۰/۸
مس	۰/۱
سیلیسیوم	۰/۴
آهن	۰/۵
کرم	۰/۱
منگنز	۰/۱
تیتانیوم	۰/۱

شکل ۲) آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای با انرژی بالا مورد استفاده در فرایند آسیای مکانیکی

استفاده شد. برای به حداقل رساندن جوش سرد و جلوگیری از بالا رفتن دما، پس از هر نیم ساعت آسیا فرایند به مدت ۱۰ دقیقه متوقف گردید. براده‌ها در کاپ‌های حاوی گلوله‌ها و تحت جو آرگون با سرعت چرخش۲۵۰ دور در دقیقه و در سه زمان مختلف ۱، ۳ و ۵ ساعت با چهار نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱، ۱۵:۱، ۲۰:۱ و ۲۵:۱ آسیاکاری شدند. پودر حاصل پس از آسیای براده‌ها، از نظر اندازه ذرات و مورفولوژی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. اندازه ذرات توسط دستگاه سنجش اندازه ذرات و مورفولوژی پودر توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) تعیین گردید. پس از بررسی پودر از لحاظ ساختاری و مورفولوژی، پودر بهینه مورد استفاده برای مرحله بعد انتخاب گردید.

۲-۳-آلیاژسازی مکانیکی پودر براده آسیاشده با ذرات تقویت‌کننده

پودر بهینه آلیاژ Al6063 حاصل از براده‌ها در مرحله قبل، پس از الک کردن با مش۱۲۰ به عنوان ماده زمینه برای انجام فرایند آلیاژسازی مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. پودر کاربید سیلسیم با اندازه متوسط ۲ میکرون به عنوان ذرات تقویت‌کننده استفاده شد که تصویر میکروسکوپ نوری مربوط به آن در شکل ۳ نشان داده شده است. پودر آسیاکاری‌شده به همراه پودر کاربید سیلسیم با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی در آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای با انرژی بالا با سه نسبت وزنی گلوله به پودر مختلف ۱۰:۱، ۱۵:۱ و ۲۰:۱ در سه زمان مختلف ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه آلیاژسازی مکانیکی شدند. از آنجا که خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت‌شده به اندازه و نحوه توزیع ذرات بستگی دارد. لازم است تا تجزیه و تحلیل میکروسکوپی بر روی پودر حاصله انجام شود تا درک بهتری از ویژگی‌های ریز ساختاری آن حاصل شود و برای استفاده در مراحل بعد بهینه گردد. در این تحقیق، برای آنالیز فازی و بررسی ترکیبات بین فلزی از طیف‌سنج پراش اشعه ایکس (XRD) مدل D5000 ساخت شرکت زیمنس آلمان، با استفاده از تابش پرتو آند فلزی Cu kα با طول موج ۱/۵٤ آنگستروم در ولتاژ ٤۰۰ کیلو ولت و جریان ۳۰ میلی آمپر انجام گرفت. الگوهای پراش اشعه ایکس در محدوده زاویه پراش (2θ) بین ۱۵ الی ۸۰ درجه ثبت شده است. بر اساس



شکل ۳) تصویر میکروسکوپ نوری ذرات کاربید سیلسیم.

قانون براگ با تغییر فاصله‌ی بین صفحات کریستالی زاویه‌ای که پیک در آن دیده می‌شود، تغییر می‌کند . از این رو تغییر فاصله‌ی بین صفحات کریستالی منجر به پهن شدگی پیک می‌گردد[19]. با توجه به مدل ارائه‌شده توسط ویلیامسون-هال، تغییر پهنای پیک بر اثر کرنش‌های شبکه‌ای از رابطه (۱) به دست می‌آید[20].

$$\beta \cos\theta = 4\varepsilon \sin\theta + \frac{k\lambda}{D} \qquad (1)$$

که در آن β پهن‌شدگی پیک بر حسب رادیان، θ زاویه برخورد پرتو تابشی به صفحه اتمی بر حسب رادیان، ε تغییر نسبی فاصله صفحات بلوری یا کرنش شبکه، k ثابت شرر، λ طول موج اشعه ایکس تابشی بر حسب آنگستروم و D اندازه ذرات بر حسب نانومتر است. ویلیامسون و هال اندازه دانه و کرنش‌های درون شبکه‌ای را عامل پهن‌شدگی پیک‌های حاصل از پراش پرتو ایکس معرفی کردند. تعیین اندازه دانه و کرنش شبکه به روش ویلیامسون-هال مطابق با رابطه (۱) و با استفاده از نرم‌افزارهای Xpert High Score و Excel انجام شد.

۳- نتایج و بحث

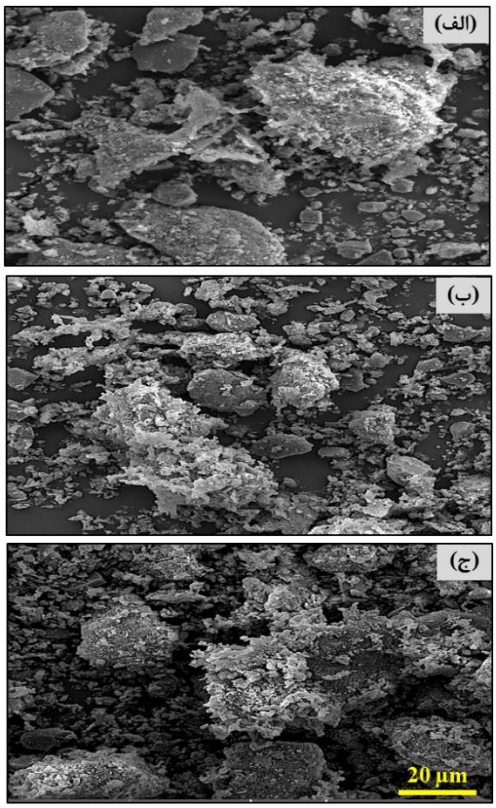
۳-۱- بررسی تاثیر همزمان زمان آسیاکاری و نسبت وزنی گلوله به پودر در فرایند آسیای مکانیکی

به طور کلی، سه سازوکار اصلی برای تغییرات مورفولوژیکی ذرات در فرآیند آسیای مکانیکی وجود دارد: (۱) سازوکار تغییر شکل پلاستیک، (۲) سازوکار جوشکاری سرد و (۳) سازوکار شکست. در مرحله اول، ذرات پودر در اثر شکست و سازوکار تغییر شکل پلاستیک روی یکدیگر می‌لغزند. در مرحله دوم، ذرات پودر تغییر شکل می‌دهند و کمی تغییر شکل الاستیک و پلاستیک و جوشکاری سرد بین آنها اتفاق می‌افتد. در مرحله سوم، ذرات پودری دچار کار-سختی شده و فرایندهای شکست و جوشکاری سرد به تعادل می‌رسند[21].

شکل ٤ تصویر FESEM براده‌های آسیاکاری‌شده را نشان می‌دهد. در طی آسیای مکانیکی، مورفولوژی براده‌ها دچار تغییرات مداوم شده است. تغییر شکل پلاستیک، جوشکاری سرد و شکست ذرات

سازوکارهای غالب هستند که بر خواص ذرات آسیاکاری‌شده تأثیر می‌گذارند. براده‌ها در شکل ٤-الف که ٥ ساعت با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱ آسیا شده‌اند نسبت به براده‌های شکل٤-ب با ٥ ساعت آسیا و نسبت وزنی گلوله به پودر۱۵:۱، ظاهر درشت‌تری دارند. با افزایش نسبت وزنی گلوله به پودر در شکل ٤-ب فرکانس برخورد بین گلوله، براده و ظرف بیشتر شده و منجر به خرد شدن بیشتر براده‌ها شده است. شکل ٤-ج تصویر FESEM براده‌های آسیاکاری‌شده طی ۳ ساعت و با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۵:۱ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در زمان پایین‌تر شکست بیشتری مشاهده می‌شود و مورفولوژی بیشتر براده‌ها به ذره‌ای تغییر کرده است. پس در زمان‌های پایین‌تر و نسبت وزنی گلوله به پودر بالاتر در طی فرایند آسیاکاری اثر شکست غالب بوده و خردشدگی و ذرات ریزتری مشاهده می‌گردد.

شکل ٥ منحنی توزیع اندازه ذرات حاصل از آنالیز اندازه ذرات را برای همان براده‌ها نشان می‌دهد. D_{50}، حداقل قطر معادل۵۰٪ ذرات و $D_{90} - D_{10}$، نشان‌دهنده گستره توزیع اندازه ذرات می‌باشد. نتایج محاسبه‌شده مربوطه در جدول ۲ آورده شده است. با بررسی منحنی توزیع اندازه ذرات، با افزایش نسبت وزنی گلوله به پودر و کاهش زمان آسیا، مقدار D_{50} کاهش یافته و توزیع اندازه ذرات نیز محدودتر شده است. سازوکار فرایند آسیاکاری مطابق سازوکاری است که توسط بنجامین و ولین[22] برای سیستم شکل‌پذیر شرح

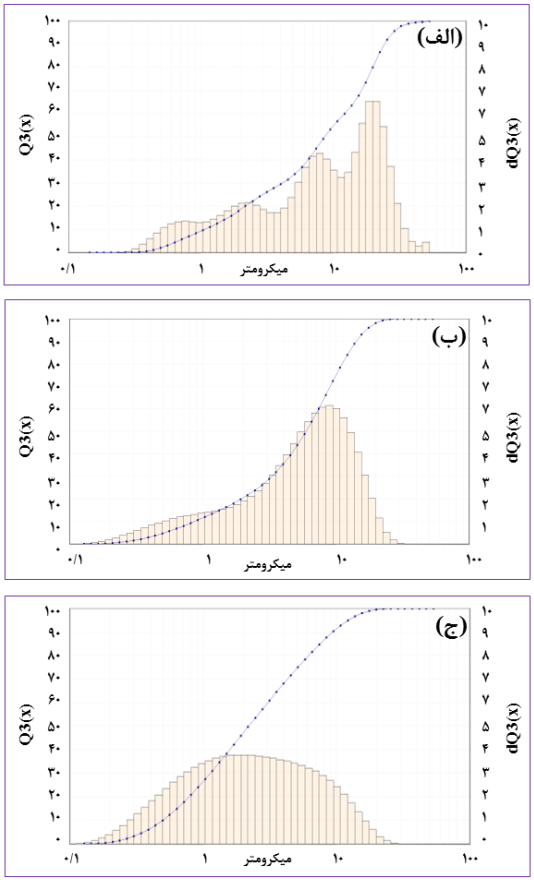


شکل ۴) تصویر FESEM پودر آسیاشده براده‌های آلیاژ Al6063 پس از الف) ٥ ساعت آسیا با BPR=10:1 ، ب) ٥ ساعت آسیا با BPR=15:1 و ج) ۳ ساعت آسیا با BPR=15:1

داده شده است. آن‌ها سازوکاری را توصیف کردند که در آن ذرات دچار تغییر شکل می‌شوند و مورفولوژی از حالت کروی به مسطح تغییر می‌کند. سپس، ذرات پهن‌شده به هم جوش خورده و ساختار لایه‌ای کامپوزیتی از فلزات سازنده را تشکیل می‌دهند. معمولاً این مرحله با افزایش اندازه ذرات همراه است. با افزایش زمان آسیا، شکنندگی ذرات افزایش می‌یابد، و ذرات تکه تکه می‌شوند و در ادامه سازوکارهای جوشکاری و شکست به تعادل می‌رسند. مرحله نهایی، فرآیند حالت پایدار است که در آن اندازه ذرات و توزیع آن‌ها تقریباً یکسان باقی می‌مانند.

۳-۲- بررسی تاثیر همزمان زمان آسیای و نسبت وزنی گلوله به پودر در فرایند آلیاژسازی مکانیکی

آلیاژسازی مکانیکی یک تکنیک قدرتمند حالت جامد برای ساخت آلیاژهای نانوکریستالی و نانوکامپوزیت‌های همگن است که شامل تغییر شکل مکرر، جوشکاری سرد و شکست در آسیای گلوله‌ای با



شکل ۵) منحنی توزیع اندازه ذرات پودر آسیاشده براده‌های آلیاژ Al6063 پس از الف) ٥ ساعت آسیا با BPR=10:1 ، ب) ٥ ساعت آسیا با BPR=15:1 و ج) ۳ ساعت آسیا با BPR=15:1

جدول۲) مقادیر قطر معادل و توزیع اندازه ذرات پودر آلیاژ Al6063 در فرایند آسیای مکانیکی

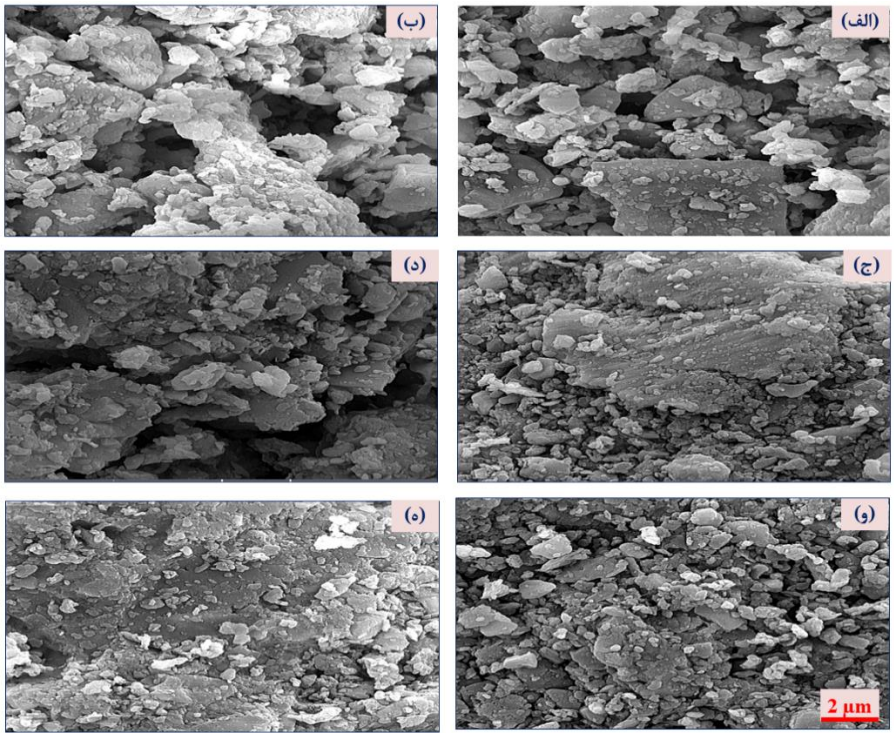
زمان آسیا (ساعت)	نسبت وزنی گلوله به پودر	D_{50}	$D_{90} - D_{10}$
٥	۱۰:۱	۱۰/۷۱	۵۲/۰۴
٥	۱۵:۱	۹/۱۳۴	۳۹/۳۶
۳	۱۵:۱	۴/۰۷۴	۱۴/۷۲

انرژی بالا است[23]. توجه به این نکته مهم است که خواص مکانیکی به دست آمده از محصولات آلیاژسازی مکانیکی به شدت به متغیرهای تلفیق و زمان بستگی دارد[24]. توزیع یکنواخت تقویت‌کننده در سراسر زمینه تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی مواد کامپوزیتی دارد. دستیابی به پیوند بهتر بین زمینه و تقویت‌کننده‌ها و جلوگیری از تجمع ذرات چالش برانگیز است. در کامپوزیت‌های زمینه فلزی با افزایش درصد وزنی تقویت‌کننده‌ها به دلیل افزایش خوشه‌های ذرات یا تجمع در زمینه، خواص مکانیکی کاهش می‌یابد. آلیاژسازی مکانیکی یک تکنیک مناسب است که یک ریزساختار خوب و همگنی از زمینه و تقویت‌کننده را ارائه می‌دهد[6].

در فرایند آلیاژسازی مکانیکی سیستم شکل پذیر-شکننده در مرحله اول، ذرات شکل پذیر دچار تغییر شکل می‌شوند در حالی که ذرات شکننده دچار تکه تکه شدن می‌شوند. هنگامی که ذرات شکل‌پذیر شروع به جوشکاری می‌کنند، ذرات شکننده در لحظه برخورد گلوله بین دو یا چند ذره شکل پذیر قرار می‌گیرند. در نتیجه، ذرات تقویت‌کننده خردشده در مرزهای سطحی ذرات فلز جوش داده شده قرار می‌گیرند و نتیجه آن تشکیل ذره کامپوزیتی واقعی است. از آنجا که جوشکاری سازوکار غالب فرآیند است، با انباشته شدن ذرات لایه‌ای مورفولوژی تغییر می‌یابد. این پدیده‌ها روند شکست را افزایش می‌دهد. سپس سازوکارهای جوشکاری و شکست به تعادل می‌رسند و باعث تشکیل ذرات کامپوزیتی با مرزهای سطحی به طور تصادفی می‌شوند[3].

پودر حاصل از آسیای مکانیکی براده‌های آلیاژ آلومینیوم Al6063 با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۵:۱ با ۳ ساعت آسیاکاری، برای انجام فرایند آلیاژسازی مکانیکی مورد استفاده قرار گرفت. تصاویر FESEMپودر کامپوزیتی Al6063-SiC با ۵، ۱۰ و ۱۵درصد وزنی تقویت‌کننده در زمان‌های مختلف آسیا با نسبت وزنی گلوله به پودر متفاوت در شکل ٦ نشان داده شده است. پودر Al6063-SiC تحت فرآیند آلیاژسازی مکانیکی، شکل‌پذیر و شکننده است، که دلیل اصلی آن تجمع ذرات شکننده در حضور ذرات آلومینیوم شکل پذیر است زیرا آلومینیوم فلزی با شکل‌پذیری بالا است که در آغاز، به دلیل عدم تعادل بین نسبت جوشکاری سرد و شکست ذرات پودر، تمایل به جمع شدن دارد. با افزایش نسبت وزنی گلوله به پودر در ابتدا تعادل نسبی بین نسبت جوش سرد و شکست برقرار می‌شود و سپس تمایل به شکست بیشتر از جوش سرد می‌شود. همانطور که با مقایسه تصاویر (٦-الف، ٦-ج و ٦-و) نسبت به تصاویر (٦-ب، ٦-د و ٦-ه) مشاهده می‌گردد.

در طی فرایند آلیاژسازی مکانیکی هنگامی که ذرات شکل‌پذیر آلومینیوم شروع به جوشکاری می‌کنند، ذرات تقویت‌کننده شکننده در اثر برخورد گلوله بین ذرات شکل پذیر قرار می‌گیرند. در نتیجه، ذرات تقویت‌کننده خردشده در مرزهای سطحی ذرات فلز جوش داده شده قرار می‌گیرند و منجر به تشکیل ذرات کامپوزیت زمینه فلزی Al6063-SiC می‌شوند. مطابق شکل (٦-و و ه) هر چه درصد ذرات تقویتی بیشتر باشد روند شکست تسریع می‌یابد. در نهایت فرآیندهای تغییر شکل، جوشکاری و پراکندگی ذرات تقویت‌کننده،



شکل ۶) تصاویر FESEM پودرهای کامپوزیتیAl6063-5wt%SiC پس از الف)۳۰ دقیقه آسیا با BPR=20:1 و ب) ۶۰ دقیقه آسیا با BPR=15:1 و پودرهای کامپوزیتی تقویت‌شده با Al6063-10wt%SiC پس ازج) ۳۰ دقیقه آسیا با BPR=20:1 و د) ۶۰ دقیقه آسیا با BPR=15:1 و پودرهای کامپوزیتی تقویت‌شده با Al6063-15wt%SiC پس از و) ۳۰ دقیقه آسیا با BPR=15:1 و ه) ۶۰ دقیقه آسیا با BPR=10:1

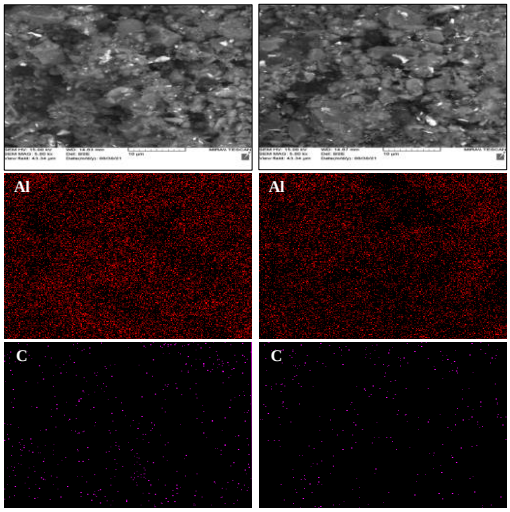
مواد را سخت کرده و سپس سازوکارهای جوشکاری و شکست به تعادل رسیده و ذرات کامپوزیتی تکه تکه‌شده تشکیل می‌شوند. بهبود سازوکارهای جوشکاری و شکست به دلیل وجود ذرات تقویت‌کننده ممکن است به این دلیل باشد که ذرات کوچک و شکننده در مخلوط به عنوان عامل کنترل فرایند، با بهبود انرژی سیستم عمل می‌کنند، بنابراین زمان آسیای لازم برای دستیابی به حالت پایدار را کاهش می‌دهد. اگر وجود تقویت‌کننده منجر به تغییر شکل زیاد زمینه فلزی شود و روند آلیاژسازی مکانیکی را پیش ببرد، درصد وزنی بالاتر تقویت‌کننده منجر به تغییر شکل بیشتر ذرات فلزی شده و روند را حتی بیشتر تسریع می‌کند. همچنین قابل ذکر است که مقدار شکست در (شکل ٦-و) نسبت به شکل (٦-ه) که در زمان کم و با نسبت وزنی گلوله به پودر بالاتر و تحت شرایط یکسان آلیاژسازی شده‌اند، بیشتر مشاهده می‌شود و ذرات تقویت‌کننده نیز به صورت یکنواخت در زمینه فلزی پراکنده شده‌اند.

آنالیز توزیع عنصری توسط توزیع انرژی طیف‌سنجی اشعه ایکس (EDS)، برای تعیین حضور ذرات تقویت‌کننده سیسلیم کاربید در زمینه فلزی آلیاژ آلومینیوم Al6063 در سه نقطه مختلف، انجام شده است که نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج حاصله وجود ذرات پراکنده سیسلیم کاربید را در داخل زمینه فلزی آلیاژ آلومینیوم Al6063 تایید می‌کند.

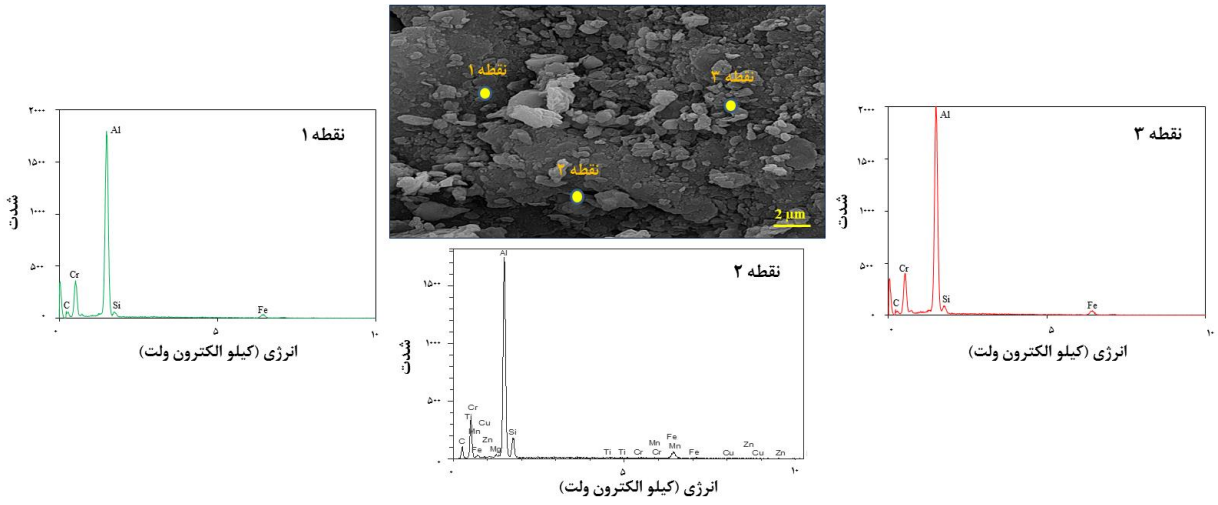
به منظور بررسی دقیق‌تر تشکیل آلیاژ و کامپوزیت‌شدن ترکیب و نحوه توزیع فاز تقویتی، نقشه عنصری (EDS-map) از پودر کامپوزیتی Al6063-10%SiC آلیاژ شده به مدت ٦٠ دقیقه به BPR=20:1 تهیه گردید که نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. برای درک بهتر توزیع فاز تقویتی و با توجه به وجود عنصر Si در داخل آلیاژ Al6063، نقشه عنصری کربن به عنوان نماینده فاز SiC در زمینه آلومینیوم از دو نقطه مختلف تهیه گردید. مشاهده می‌گردد که عنصر کربن در زمینه آلومینیوم پراکنده شده است و پودر کامپوزیتی تشکیل شده است.

۳-۳- الگوی پراش اشعه ایکس پودرهای کامپوزیتی و محاسبه اندازه دانه

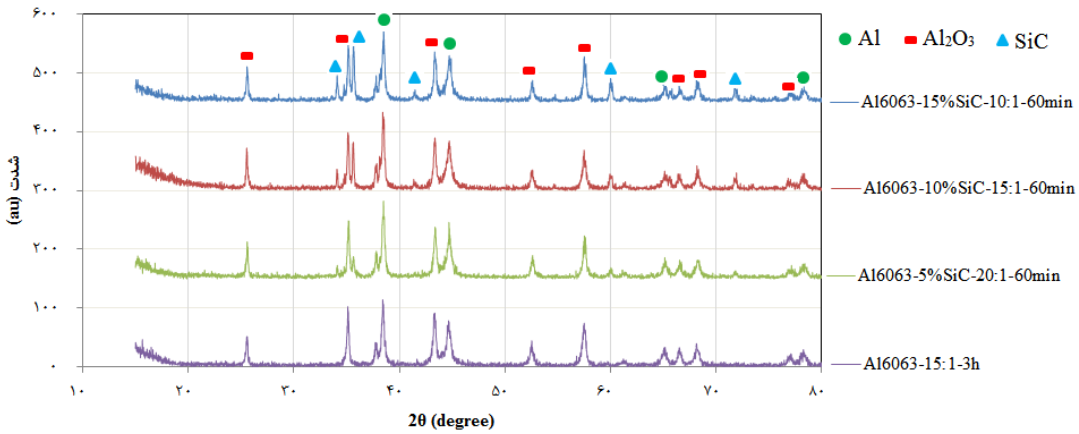
آنالیز XRD مفیدترین روش برای تجزیه و تحلیل کمی و کیفی ترکیبات است. این تکنیک اطلاعاتی مانند انواع و ماهیت فاز بلوری موجود، ساختار فازها، درجه بلوری، مقدار محتوای آمورف و ... را فراهم می‌کند که به هیچ وجه نمی‌توان از روش‌های دیگر به دست آورد. شکل ۹ نتایج حاصل از آنالیز طیف‌سنجی پراش اشعه ایکس(XRD)، را نشان می‌دهد. درشکل ۹ آنالیز پراش اشعه ایکس مربوط به پودر آلیاژ Al6063 آسیاکاری‌شده و پودر کامپوزیتی آلیاژ Al6063 با ۵ ، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده کاربید سیلسیم نشان داده شده است. در تجزیه و تحلیل XRD، پیک‌های مربوط به Al و SiC نشان داده شده است و عدم وجود هرگونه ترکیب واکنشی قابل توجهی مانند Al_4C_3 و SiO_2 مشاهده می‌گردد که وجود این ترکیبات باعث تفکیک ذرات می‌شود. تشکیل Al_4C_3 شکننده در رابط یک کامپوزیت معمولاً منجر به تخریب خصوصیات



شکل ۸) آنالیز EDS-map از پودر کامپوزیتی Al6063-10wt% SiC در زمان۶۰ دقیقه با BPR=20:1



شکل ۷) تصویر FESEM و آنالیز EDS پودر کامپوزیتی Al6063-10wt% SiC در زمان۶۰ دقیقه با BPR=20:1



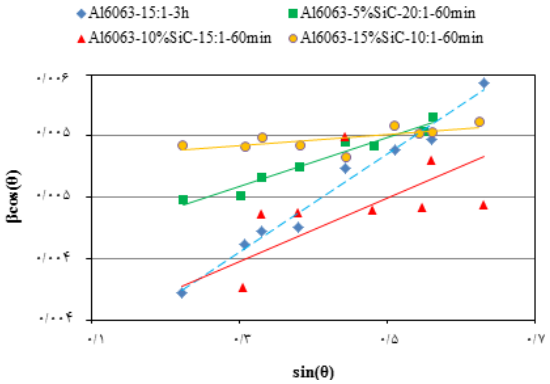
شکل ۹) الگوی پراش اشعه ایکس برای پودر آلیاژ Al6063 پس از ۳ ساعت آسیا با BPR=15:1، پودر کامپوزیتی Al6063-5wt% SiC پس از ۶۰ دقیقه آسیا با BPR=20:1، پودر کامپوزیتی Al6063-10wt% SiC پس از ۶۰ دقیقه آسیا با BPR=15:1 و پودر کامپوزیتی Al6063-15wt% SiC پس از ۶۰ دقیقه آسیا با BPR=10:1

مکانیکی، کاهش مقاومت سطحی تقویت‌کننده/زمینه و افزایش حساسیت به خوردگی می‌شود. همچنین، به دلیل ماهیت آب دوست بودن، Al_4C_3 باعث افزایش سرعت رشد ترک خستگی در کامپوزیت‌های زمینه فلزی در محیط رطوبت می‌شود. تشکیل لایه SiO_2 روی SiC باعث ترشوندگی ضعیف می‌شود که در نهایت منجر به تخلخل می‌شود[25].

اگرچه فرایند آسیای مکانیکی-آلیاژسازی مکانیکی در یک محیط تحت کنترل اتمسفر (محیط آرگون) انجام شد، اما برخی از پیک‌های مربوط به Al_2O_3 نیز مشاهده شد. در طی فرآیند آسیاکاری، برخورد مداوم بین پودر، گلوله و محفظه آسیای، منجر به تمیز شدن سطوح روی پودرها (درون محفظه آسیا) می‌شود. اکسیداسیون ممکن است به دلیل مقدار کمی اکسیژن درون آرگون یا به دلیل تماس با جو هنگام برداشتن پودرها از آسیا، روی این سطوح تمیز رخ دهد.

براساس تئوری ارائه‌شده توسط ویلیامسون-هال عرض پیک در نصف شدت بیشینه تابعی از اندازه دانه و کرنش‌های درون شبکه‌ای است. با استفاده از داده‌های مستخرج از روی الگوی پراش اشعه ایکس و نرم‌افزارXpert High Score، برای نمونه‌های پودر آلیاژ Al6063 و پودر کامپوزیتی آلیاژ Al6063 با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی تقویت‌کننده کاربید سیلسیم با در نظر گرفتن$\sin\theta$ در امتداد محورX و $\beta\cos\theta$ در امتداد محورY رسم گردید که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. مطابق مدل ویلیامسون-هال، اندازه دانه از طریق عرض از مبدا خط به دست آمده، محاسبه می‌گردد. مطابق نتایج شکل ۱۰، اندازه دانه برای هر کدام از نمونه‌ها از تقاطع نمودار با محورY استخراج شده است. مقادیر به دست آمده در جدول ۳ آورده شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده، مشاهده شده است که با افزودن ذرات تقویت‌کننده کاربید سیلسیم به زمینه آلیاژ Al6063 اندازه دانه کاهش یافته است. بعد از ٦٠ دقیقه آسیاکاری، اندازه دانه پودرهای کامپوزیتی آلیاژ Al6063 با ۵ ،۱۰ و ۱۵ درصد وزنی ذرات



شکل ۱۰) نمودار ویلیامسون-هال برای نمونه‌های پودر کامپوزیتی

جدول ۳) مقادیر اندازه دانه به دست آمده از روش ویلیامسون-هال

زمان آسیا نسبت وزنی گلوله به پودر	درصد وزنی SiC	اندازه دانه (نانومتر)	RSD (%)
۳ ساعت	۰	۴۶/۲	۱۲
۶۰ دقیقه	۵	۳۳/۸	۵
۶۰ دقیقه	۱۰	۳۲/۲	۱۱
۶۰ دقیقه	۱۵	۲۹/۴	۲

تقویت‌کنندهSiC به ترتیب ۳۳/۸، ۳۳/۲ و ۲۹/٤ نانومترکاهش یافته است. همچنین، اندازه دانه با افزایش محتوای SiC نیز کاهش می‌یابد. پس می‌توان گفت که ذرات تقویت‌کننده کاربید سیلسیم به عنوان عامل فرایند موجب تسریع فرایند آسیاکاری و کاهش اندازه دانه می‌شود همانطور که از نتایج حاصل از تصاویرFESEM نیز مشاهده شد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق پودر کامپوزیتی Al6063 تقویت‌شده با ذرات SiC، از طریق فرایند آلیاژسازی مکانیکی در آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای با انرژی بالا، با درصدهای وزنی مختلف ذرات تقویت‌کننده و با متغیرهای مختلف زمان و نسبت وزنی گلوله به پودر، تهیه گردید. ریزساختار و مورفولوژی پودر کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر حاصل شده است:

۱) متغیرهای فرایند نقش مهمی در فرایند آسیای مکانیکی دارند، به گونه‌ای که با مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی و منحنی توزیع اندازه ذرات برای پودرهای آسیاشده در سه زمان مختلف آسیا با چهار نسبت وزنی گلوله به پودر، مشخص شد که در زمان‌های پایین آسیا با نسبت وزنی گلوله به پودر بالا می‌توان به پودر کامپوزیتی با اندازه ذرات ریزتر و توزیع مناسب تر دست یافت.

۲) در فرایند آسیای مکانیکی، پودرآلیاژ Al6063 پس از ۵ ساعت آسیای مکانیکی با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۵:۱در مقایسه با پودر آلیاژ Al6063 با ۵ ساعت آسیای و نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰:۱، مقدار D_{50} از ۱۰/۷۱ به ۹/۱۳٤ میکرومتر کاهش یافت و توزیع اندازه ذرات نیز از ۵۲/۰٤ به ۳۹/۳٦ میکرومتر محدودتر شد. در مقایسه با پودر آلیاژ Al6063 با۳ ساعت آسیای و نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۵:۱، با کاهش زمان آسیا مقدار D_{50} از ۹/۱۳٤ به ٤/۰۷٤ میکرومتر کاهش یافت و توزیع اندازه ذرات نیز از ۳۹/۳٦ به ۱٤/۷۲میکرومتر محدودتر شد.

۳) با مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای پودرهای حاصل از آلیاژسازی مکانیکی پودرآلیاژ Al6063با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی ذرات تقویت کننده کاربید سیلسیم در سه زمان مختلف آسیا با سه نسبت وزنی گلوله به پودر، مشخص شد که وجود ذرات تقویت‌کننده کاربید سیلسیم موجب تسریع در فرایند آلیاژسازی شده و کاهش بیشتر اندازه ذرات را موجب می‌شود.

٤) با توجه به مدل ویلیامسون-هال، با افزودن ذرات تقویت‌کننده کاربید سیلسیم به زمینه فلزی آلیاژ Al6063، اندازه دانه کاهش یافت.

۵) پراکندگی یکنواخت ذرات تقویت‌کننده کاربید سیلسیم داخل زمینه فلزی آلیاژ Al6063، توسط آنالیز عنصری EDS-map مورد تایید قرار گرفت.

٦) در الگوی پراش اشعه ایکس برای پودر آلیاژ Al6063 تقویت‌شده با ذرات تقویت کننده کاربید سیلسیم پیک‌های مربوط به Al و SiC قابل مشاهده است. اگرچه فرایند آسیای مکانیکی-آلیاژسازی مکانیکی در یک محیط تحت کنترل اتمسفر (محیط آرگون) انجام شد، اما برخی از پیک‌های مربوط به Al_2O_3 نیز مشاهده شد.

تشکر و قدردانی: موردی وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و صحت نتایج آن نیز بر عهده آن ها است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافعی با اشخاص و سازمانهای دیگر ندارد.

سهم نویسندگان: پریسا فکری (نویسنده اول: ٤۰٪)، وحید پویافر (نویسنده دوم: ۳۰٪)، رامین مشک آبادی (نویسنده سوم: ۳۰٪)

منابع مالی: منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

منابع

1- Ghasemi P, Rahmani O. An experimental investigation of energy absorption in GLARE fiber metal laminates reinforced by CNTs under low velocity impact. Modares Mechanical Engineering. 2018;18(8):81-91.

2- Sharma DK, Mahant D, Upadhyay G. Manufacturing of metal matrix composites: A state of review. Materials Today: Proceedings. 2020;26:506-19.

3- Asgharzadeh H, Simchi A, Kim H. In situ synthesis of nanocrystalline Al6063 matrix nanocomposite powder via reactive mechanical alloying. Materials Science and Engineering: A. 2010;527(18-19):4897-905.

4- Sattari S, Jahani M, Atrian A. Effect of volume fraction of reinforcement and milling time on physical and mechanical properties of Al7075–SiC composites fabricated by powder metallurgy method. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2017;56(5):283-92.

5- Pradeep Devaneyan S, Ganesh R, Senthilvelan T. On the mechanical properties of hybrid aluminium 7075 matrix composite material reinforced with SiC and TiC produced by powder metallurgy method. Indian Journal of Materials Science. 2017;2017.

6- Samal P, Vundavilli PR, Meher A, Mahapatra MM. Recent progress in aluminum metal matrix composites: A review on processing, mechanical and wear properties. Journal of Manufacturing Processes. 2020;59:131-52.

7- Qu X, Wang F, Shi C, Zhao N, Liu E, He C, et al. In situ synthesis of a gamma-Al2O3 whisker reinforced aluminium matrix composite by cold pressing and sintering. Materials Science and Engineering: A. 2018;709:223-31.

8- Xu C, Wei B, Ma R, Liang J, Ma X, Wu D. Fabrication of aluminum–carbon nanotube composites and their electrical properties. Carbon. 1999;37(5):855-8.

9- Kwon H, Estili M, Takagi K, Miyazaki T, Kawasaki A. Combination of hot extrusion and spark plasma sintering for producing carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites. Carbon. 2009;47(3):570-7.

10- Zhou S, Zhang X, Ding Z, Min C, Xu G, Zhu W. Composites Part A: Appl. Sci. 2007;38:301-6.

11- Wu Y, Kim G-Y. Carbon nanotube reinforced aluminum composite fabricated by semi-solid powder processing. Journal of Materials Processing Technology. 2011;211(8):1341-7.

12- Suryanarayana C, Al-Aqeeli N. Mechanically alloyed nanocomposites. Progress in Materials Science. 2013;58(4):383-502.

13- Aslibeiki B, Kameli P. Structural and magnetic properties of Co/Al2O3 cermet synthesized by mechanical ball milling. Ceramics International. 2020;46(12):20116-21.

14- Suśniak M, Pałka P, Karwan-Baczewska J. Influence of milling time on the crystallite size of AlSi5Cu2/SiC

composite powder. Archives of Metallurgy and Materials. 2016;61.
15- Surya MS, Gugulothu S. Fabrication, mechanical and wear characterization of silicon carbide reinforced Aluminium 7075 metal matrix composite. Silicon. 2021:1-10.
16- ŞİMŞEK D, SİMSEK İ, ÖZYÜREK D. Production and Characterization of Al-SiC Composites by Mechanical Milling. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. 2019;8(1):227-33.
17- Bhouri M, Mzali F. Study of Al 2017 alloy prepared by recycling method via powder metallurgy route. Advances in Materials, Mechanics and Manufacturing: Springer; 2020. p. 9-16.
18- Canakci A, Varol T. A novel method for the production of metal powders without conventional atomization process. Journal of Cleaner Production. 2015;99:312-9.
19- Dinnebier R, Billinge S. The Bragg equation derived. 2019.
20- Dey PC, Das R. Impact of silver doping on the crystalline size and intrinsic strain of MPA-capped CdTe nanocrystals: A study by Williamson–Hall method and size–strain plot method. Journal of Materials Engineering and Performance. 2021;30(1):652-60.
21- Zhang D. Processing of advanced materials using high-energy mechanical milling. Progress in Materials Science. 2004;49(3-4):537-60.
22- Benjamin JS, Volin T. The mechanism of mechanical alloying. Metallurgical Transactions. 1974;5(8):1929-34.
23- Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling. Progress in Materials Science. 2001;46(1-2):1-184.
24- Fogagnolo J, Velasco F, Robert M, Torralba J. Effect of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties of aluminium matrix composite powders. Materials Science and Engineering: A. 2003;342(1-2):131-43.
25- Kamboj A, Kumar S, Singh H. Fabrication and characterization of Al6063/SiC composites. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2013;227(12):1777-87.