

بررسی تأثیر متغیرهای فرآوری و میزان فاز تقویت‌کننده بر ریزساختار و سختی نانوکامپوزیت AI7075-CNT تهیه‌شده به روش فرآوری پودری نیمه‌جامد

استادیار، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، pouyafar@tabrizu.ac.ir
 کارشناس ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،
 khoshkhabar.masood@gmail.com
 استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
 r_meshkabadi@uma.ac.ir

وحید پویافر*
مسعود خوش‌خبر قراملکی
رامین مشک‌آبادی

چکیده

در این تحقیق، از روش فرآوری پودری نیمه‌جامد برای ساخت نانوکامپوزیت AI7075-CNT استفاده شد. تأثیر متغیرهای فرآیند شامل مدت زمان نگهداری تحت‌فشار، دمای نیمه‌جامد و میزان فاز تقویت‌کننده CNT بر ریزساختار و سختی نمونه‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که سختی نانوکامپوزیت 1%-CNT از آلیاژ پایه بیشتر است اما سختی نمونه 2%-CNT بین آلیاژ پایه و آلیاژ 1%-CNT قرار گرفت. مدت زمان اعمال فشار و دمای نیمه‌جامد تأثیر محسوسی بر سختی نمونه‌ها نگذاشت. پرس‌کاری در دمای ۶۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۰ دقیقه به‌عنوان متغیرهای مناسب انتخاب گردیدند. ریزساختار نمونه‌ها نشان داد که در آلیاژ 1%-CNT، فاز تقویت‌کننده در زمینه آلومینیومی کاملاً نفوذ کرده و برخلاف نمونه 2%-CNT جمعی از نانوذرات CNT در سطح نمونه وجود ندارد. بررسی کمی نتایج نشان داد که درصد مناسب از CNT دارای بیشترین تأثیر بر مقدار سختی است. افزایش دما از ۶۰۰ به ۶۲۰ درجه سلسیوس به میزان ۱۰ درصد و افزایش مدت زمان اعمال فشار از ۵ به ۱۵ دقیقه نیز به میزان ناچیز دو درصد سبب افزایش سختی نمونه‌های 1%-CNT نسبت به نمونه‌های آلیاژ پایه شده است.

واژه‌های کلیدی: فرآوری نیمه‌جامد پودری، نانوکامپوزیت AI7075-CNT، نانولوله کربنی، فاز تقویت‌کننده، سختی، ریزساختار.

Investigation of the Effect of Forming Variables and Reinforcement Phase on the Microstructure and Hardness of AI7075-CNT Nanocomposite Fabricated by Semi-solid Powder Processing

V. Pouyafar
M. Khoshkhabar Garamaleki
R. Meshkabadi

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
 Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
 Department of Engineering Sciences, Faculty of Advanced Technologies, University of
 Mohaghegh Ardabili, Namin, Iran

Abstract

In this research, semi-solid powder processing was used to fabricate AI7075-CNT nanocomposite. The effect of process variables including compression time, semi-solid temperature and the CNT percent on the sample's hardness and microstructure was investigated. The 1%-CNT nanocomposite is observed to be superior in hardness compared to the base alloy, but the 2%-CNT sample's hardness was between the base alloy and 1%-CNT sample. It was observed that the compression time and semi-solid temperature do not have a significant effect on the sample's hardness. Compression for 10 minutes and forming temperature of 620 °C were selected as the suitable variables. Microstructural examination showed that in 1%-CNT alloy, the reinforcing phase is completely penetrated in the aluminum matrix and there is no CNT accumulation on the sample's surface unlike the 2%-CNT sample. Quantitative analysis showed that a proper percentage of CNT had the greatest effect on the hardness. Increasing the temperature from 600 to 620 °C by 10% and increasing the compression time from 5 to 15 minutes by 2% increased the hardness of 1%-CNT samples compared to the base alloy.

Keywords: Semi-solid powder processing, AI7075-CNT nanocomposite, Carbon nano tube, Reinforcement, Hardness, Microstructure.

فرآوری پودری نیمه‌جامد روشی است که متالورژی پودر سنتی را با شکل‌دهی نیمه‌جامد ترکیب کرده و می‌تواند کامپوزیت‌های زمینه فلزی را با هزینه‌ی پایین و کارایی بالا تولید کند. با این وجود فناوری‌های ساخت فعلی قابلیت اطمینان ناکافی و بازدهی اقتصادی نامناسب دارند و قادر به برآوردن تقاضاهای رو به رشد در زمینه کامپوزیت‌های پایه فلزی نیستند. برای غلبه بر مشکلات فوق، فرآوری پودری نیمه‌جامد یکی از روش‌های منحصر به فردی است که می‌تواند مواد کامپوزیتی را با به‌کارگیری مخلوط‌های پودری در حالت نیمه‌جامد تولید کند [۶]. این روش سابقه به نسبت کوتاهی در مقایسه با سایر روش‌های شکل‌دهی شروع‌شده از سال ۱۹۷۰ دارد؛ با این حال در

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی مزایای بسیار زیادی نسبت به آلیاژها و فلزات خالص از خود نشان می‌دهند؛ به‌ویژه می‌توان به توانایی آن‌ها در حفظ خواص مکانیکی در دماهای بالا اشاره کرد [۱]. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها به مشخصات فاز تقویت‌کننده مانند درصد حجمی، اندازه ذرات و فاصله بین ذرات بستگی دارد [۲ و ۳]. در بین کامپوزیت‌های زمینه فلزی موجود، کامپوزیت‌های بر پایه آلیاژهای آلومینیوم به دلیل رسانایی خوب الکتریکی و گرمایی، چگالی کم، مقاومت سایشی و خوردگی عالی در صنایع هوافضا، خودروسازی و ساختمانی به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند [۴ و ۵].

* نویسنده مکاتبه‌کننده، آدرس پست الکترونیکی: pouyafar@tabrizu.ac.ir

فرآوری مواد آلیاژی و کامپوزیتی با موفقیت به کار برده شده است [۷]. مطالعات پیشین پتانسیل فرآوری پودری نیمه جامد را در ساخت کامپوزیت‌های مختلف فلزی از جمله در تهیه کامپوزیت Al-SiC [۸]، کامپوزیت Al-Ti [۹] و کامپوزیت Al-Mg نشان داده است [۱۰]. اسپت و همکاران، آلیاژ Al-Cu را با ترکیب متالورژی پودر و فرآیند شکل‌دهی نیمه‌جامد با هدف رسیدن به خواص ایده‌آلی از ماده تولید کردند. آن‌ها با بررسی تأثیر پارامترهای تولید مانند کسر مایع و چگالی مختلف عناصر، سطوح مناسبی از پارامترها را تعیین کردند که می‌تواند در ساخت این آلیاژ با خواص بهبود یافته در زمینه انتقال گرما نسبت به روش‌های سنتی مورد استفاده قرار گیرد [۱۱]. وو و همکاران، کامپوزیت $Al_{6061}-CNT^1$ را برای اولین بار توسط روش شکل‌دهی پودری نیمه جامد فرآوری کردند. نتایج آن‌ها تهیه نمونه کامپوزیتی با تراکم بالای ۹۹ درصد همراه با توزیع یکنواخت فاز تقویت‌کننده را نشان داد [۱۲]. چن و همکاران کامپوزیت $Al-(h-BN)^2$ را با تراکم کم و بیش کامل با روش فرآوری پودری نیمه جامد با موفقیت ساختند. آن‌ها نشان دادند که مقاومت فشاری و کرنش شکست کامپوزیت‌های مورد بررسی با کاهش اندازه پودر آلومینیوم افزایش می‌یابد [۱۳]. در مطالعه چن و همکاران از این روش برای ساختن کامپوزیت $Al_{2024}-GNP^3$ استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده بهبود مقاومت و شکل‌پذیری مطلوب نمونه‌ها بود [۱۴]. فریبا همکاران، تأثیر متغیرهای فرآوری پودری نیمه جامد را بر کیفیت کامپوزیت‌های Al-SiC که از براده‌های ماشین‌کاری آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ ساخته شده بود را تجزیه و تحلیل کردند. نتایج بیانگر پراکندگی بهتر فاز تقویت‌کننده در زمینه با افزایش زمان مخلوط کردن و دمای شکل‌دهی بود [۱۵]. آرانکه و همکاران، خصوصیات تریبولوژیکی کامپوزیت Al-CNT با درصدهای وزنی مختلف ۰/۵، ۰/۷۵ و ۰/۷۵ را بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده، نشان داد که افزایش درصد وزنی فاز تقویت‌کننده باعث کاهش سرعت سایش کامپوزیت می‌شود [۱۶]. لوو همکاران، کامپوزیت Mg-Zn مورد استفاده در پزشکی را به روش نوین قالب‌گیری پودری نیمه‌جامد تولید کردند و تأثیر میزان فاز Zn و دمای نیمه‌جامد را بر روی چگالی نسبی، ریزساختار و سختی نمونه‌های حاصل بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که این روش پتانسیل بالایی در تولید آلیاژهای بر پایه منیزیم در پزشکی دارد [۱۷].

در تحقیقات قبلی تأثیر هم‌زمان متغیرهای فرآیند بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار نمونه‌ها صورت نگرفته و تأثیر متغیرها به‌صورت جداگانه و مجزا بررسی شده است. در اغلب تحقیقات صورت گرفته به‌منظور بهبود خواص مکانیکی نمونه، تأثیر به‌کارگیری مواد تقویت‌کننده مختلف نظیر نانو مواد مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتیجه آن گسترش به‌کارگیری این ذرات در ساخت نانوکامپوزیت‌ها بوده است. مشاهده می‌گردد که تأثیر متغیرهای مؤثر در انجام فرآوری پودری نیمه جامد شامل مدت زمان و دمای نیمه جامد مناسب برای این امر چندان مورد بررسی قرار نگرفته است. هدف از انجام این تحقیق در مرحله نخست تهیه نانوکامپوزیتی بر پایه آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ با توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربنی به‌عنوان ماده تقویت‌کننده با به‌کارگیری

روش فرآوری پودری نیمه‌جامد بوده و در ادامه بررسی تأثیر متغیرهای فرآیند بر مقدار سختی نمونه‌های حاصل و بررسی ریزساختار آن‌ها است. متغیرهایی نظیر درصد نانولوله کربنی مورد استفاده، مدت زمان اعمال فشار و دمای انجام فرآیند مد نظر قرار گرفته و با به‌کارگیری روش طراحی آزمایش چند عاملی کامل^۴ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در پژوهش حاضر، ریزساختار نانوکامپوزیت‌های تهیه‌شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۵ (SEM) ارزیابی شده و سختی نمونه‌های تهیه‌شده نیز با به‌کارگیری دستگاه سختی سنجی تعیین گردیده‌اند.

۲- مبانی و روش‌ها

۲-۱- مواد اولیه پودری

پودرهای مورد استفاده در این تحقیق، با به‌کارگیری همزن مکانیکی و آسیاب سیاره‌ای با انرژی بالا بر پایه نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش فکری و همکاران تهیه شدند [۱۸]. این محققان، پس از آلیاژسازی مکانیکی، تأثیر متغیرهای فرآیند شامل زمان آلیاژسازی، نسبت وزنی گلوله به پودر^۶ و درصد وزنی نانولوله‌های کربنی را بر روی پودر کامپوزیتی $Al_{7075}-MWCNT^7$ از نظر ریخت‌شناسی توسط آنالیز اندازه ذرات و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی و از نظر ترکیبات فلزی توسط پراش اشعه ایکس^۸ (XRD) مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها نشان دادند که پراکندگی یکنواخت ذرات فاز تقویتی در میزان دو درصد، مدت زمان آلیاژسازی ۱۵ و ۲۰ دقیقه و نسبت وزنی گلوله به پودر ۲۰ حاصل می‌شود. پس از رسیدن به پراکندگی مطلوب ذرات فاز تقویتی، قطعات نانوکامپوزیت به روش فرآوری پودری نیمه جامد در شرایط عملیاتی مختلف تهیه گردیدند.

۲-۲- معرفی تجهیزات و شرح کار

در شکل ۱-الف، تجهیزات به کار رفته در پژوهش حاضر نشان داده شده‌اند. پرس دستی از نوع پرس پیچی جهت اعمال فشار توسط اپراتور تعبیه گردیده است. عملکرد پرس به این صورت است که با حرکت چرخشی میله، فشار عمودی اعمال‌شده توسط سنبه قالب مستقیماً به نمونه منتقل می‌شود. برای رسیدن دمای نمونه به محدوده دمایی نیمه جامد از کوره مقاومتی استفاده شده است که ترموکوپل و سیستم کنترلی آن این قابلیت را دارد که با اندازه‌گیری مقدار گرمای اتلافی، مدت زمان مناسب برای روشن و خاموش کردن المنت‌های گرمایی را محاسبه کند تا دما در محدوده موردنظر ثابت باقی بماند. مقدار فشار اعمالی برای انجام فرآیند توسط یک عدد لودسل که نوعی حسگر الکترونیکی برای اندازه‌گیری نیرو است کنترل می‌گردد تا در صورت افزایش و یا کاهش فشار اقدام به جبران آن گردد. قالب ساخته‌شده از جنس فولاد ضدزنگ 316L است که در شکل ۱-ب و نقشه‌های ساخت در شکل ۱-ج نشان داده شده است. همچنین نمونه حاصل از فرآوری پودری نیمه‌جامد در شکل ۱-د نشان داده شده است.

⁴ Full factorial design of experiment

⁵ Scanning Electron Microscopy (SEM)

⁶ Ball to Powder Ratio (BPR)

⁷ Multi-Walled Carbon Nanotube (MWCNT)

⁸ X-ray Diffraction (XRD)

¹ Carbon Nanotube (CNT)

² Hexagonal boron Nitride (h-BN)

³ Graphene Nanoplatelet (GNP)

۲-۳- طراحی آزمایش و نحوه انجام

برای جلوگیری از کاهش هزینه‌ها از روش طراحی آزمایش در این تحقیق استفاده شده است تا بتوان تأثیرگذاری نتایج به‌دست‌آمده را با تغییر متغیرهای دخیل در فرآیند تهیه نمونه نانوکامپوزیتی تعیین نمود. در این راستا، از روش طراحی آزمایش چند عاملی کامل و با به کارگیری نرم‌افزار Minitab استفاده شده است. برای انتخاب محدوده دمایی مناسب برای ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیتی، از روش استفاده شده در پژوهش آقاجانی و همکاران که بر پایه انتخاب محدوده دمایی مناسب با رسیدن به خواص فیزیکی و مکانیکی بهتر قطعات تولید شده به روش فرآوری پودری نیمه‌جامد است استفاده گردید. نتایج حاصل از اندازه‌گیری چگالی نمونه‌ها در پژوهش مذکور نشان داد که با افزایش دمای نیمه‌جامد، چگالی نسبی آلیاژ افزایش می‌یابد. مقدار چگالی نسبی در محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۶۲۰ درجه سلسیوس بیشترین مقدار خود را دارد [۱۹]. با توجه به اینکه سرعت تکامل ریزساختار از سرعت افزایش دما کمتر است، لازم است مدت زمانی برای به تعادل رسیدن فاز نیمه جامد در دمای مورد نظر داده شود تا کسر مایع تشکیل یافته به مقدار تعادلی خود برسد؛ چرا که بیشتر اوقات کسر مایع از مقدار مربوطه تعیین شده توسط آنالیز DSC^۱ در دمای معین کمتر است [۲۰ و ۲۱]. همچنین، با افزایش مدت زمان گرما دهی، کسر مایع افزایش یافته و ریزساختار متراکم و همگن تری ایجاد می‌شود و بنابراین، مقدار استحکام فشاری و سختی نمونه می‌تواند بیشتر شود.

بر پایه توضیحات داده‌شده، دمای نیمه جامد مناسب برای فرآوری دماهای ۶۰۰، ۶۱۰ و ۶۲۰ درجه سلسیوس و مدت زمان اعمال فرآیند ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه برای نمونه‌های حاوی صفر، ۱ و ۲ درصد CNT در نظر گرفته شد. در جدول ۱ عوامل و سطوح در نظر گرفته شده نشان داده شده است. با توجه به اینکه تعداد سه عامل در سه سطح مختلف در این تحقیق بررسی شده است نرم‌افزار تمام حالت‌های ممکن برای آزمایش‌ها را که تعداد ۳^۳ آزمایش می‌باشد طراحی و ارائه نمود. طراحی آزمایش چند عاملی کامل شامل آزمایش‌هایی از تمام ترکیب‌های ممکن سطوح متغیرها برای همه عوامل است. در این روش امکان بررسی اثرات متقابل و انجام آزمایش‌ها به‌صورت موازی وجود دارد اما عیب بزرگ آن تعداد آزمایش‌های زیاد است و برای تعداد عوامل و سطوح بیشتر از ۳ توجیه کاربردی ندارد. برای هر یک از آزمایش‌های طراحی شده، مقدار سختی به‌عنوان پاسخ آزمایش تعیین گردید.

جرم پودرهای آماده‌شده از حاصل‌ضرب چگالی پودر (۲/۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب) در حجم حفره قالب به‌دست‌آمده و بر پایه ترکیب موردنظر در طراحی آزمایش به روش چند عاملی کامل به‌ترتیب درون قالب ریخته شدند.

پس از ریختن پودرها به درون قالب، برای انجام فرآیند و به حداقل رساندن تخلخل پودرها، فشار اولیه ۵ مگاپاسکال به‌مدت ۱۰ دقیقه به نمونه‌ها اعمال گردید. سپس مجموعه قالب در داخل کوره تحت گاز آرگون و زیر پرس پیچی قرار گرفت و دمای کوره تا رسیدن به محدوده دمایی نیمه جامد موردنظر با نرخ ۷/۳ درجه سلسیوس بر دقیقه افزایش یافت. پس از رسیدن دمای پودرها به محدوده موردنظر فشار به‌تدریج افزایش یافت که در حین افزایش فشار تغییرات محسوس بر روی

نمایشگر ظاهر شد. دلیل این تغییرات فشار می‌تواند به هم دما شدن قالب با اجزای واسط و رسیدن دمای پودر به دمای نیمه‌جامد مربوط باشد. لذا لازم است فشار اعمالی به پودر بر روی ۵۰ مگاپاسکال ثابت نگه داشته شود. پس از طی مدت زمان هم‌دمایی، فشار اعمالی به ۱۰۰ مگاپاسکال افزایش یافت و تا اتمام زمان آزمایش ثابت باقی ماند. پس از اتمام زمان آزمایش، پرس به‌صورت کامل خلاص شده و قطعات در کوره به آرامی سرد شدند.

۲-۴- آزمایش‌های انجام‌شده

سختی نمونه‌های کامپوزیتی با به‌کارگیری دستگاه ریز سختی سنجی ویکرز SCTMC مدل HV-1000Z اندازه‌گیری شد. قبل از سختی‌سنجی سطح نمونه‌ها با به‌کارگیری کاغذهای ساینده تا شماره ۱۲۰۰ سمباده‌زنی شدند. اندازه‌گیری برای هر نمونه از نقاط مختلف فاز زمینه، تقویت‌کننده و مرزخانه انجام گرفت. آزمون ریز سختی سنجی بر پایه استاندارد ASTM E384 [۲۲] به روش ویکرز با فرورونده‌ی الماسی با زاویه‌ی ۱۳۶ درجه و اعمال نیروی ۵۰۰ گرم نیوتن به‌مدت ۱۲ ثانیه انجام شد. فاصله انجام آزمون بر روی هر نمونه ۵ میلی‌متر انتخاب گردید. برای این منظور حداقل سه مرتبه سختی‌سنجی در هر نمونه انجام و نتایج با انحراف از میانگین حدود ۱۰ درصد گزارش شد. برای این‌که سختی گزارش‌شده، سختی فازهای مختلف نباشد و با توجه به اینکه برای سختی‌سنجی ماکرو نیاز به اعمال نیروهای بزرگ است که به نسبت ابعاد نمونه احتمال تخریب آن وجود دارد در ریز سختی-سنجی صورت گرفته مقدار نیرو تا حدودی بزرگ انتخاب شد که محل اثر پروب نیز بزرگ باشد.

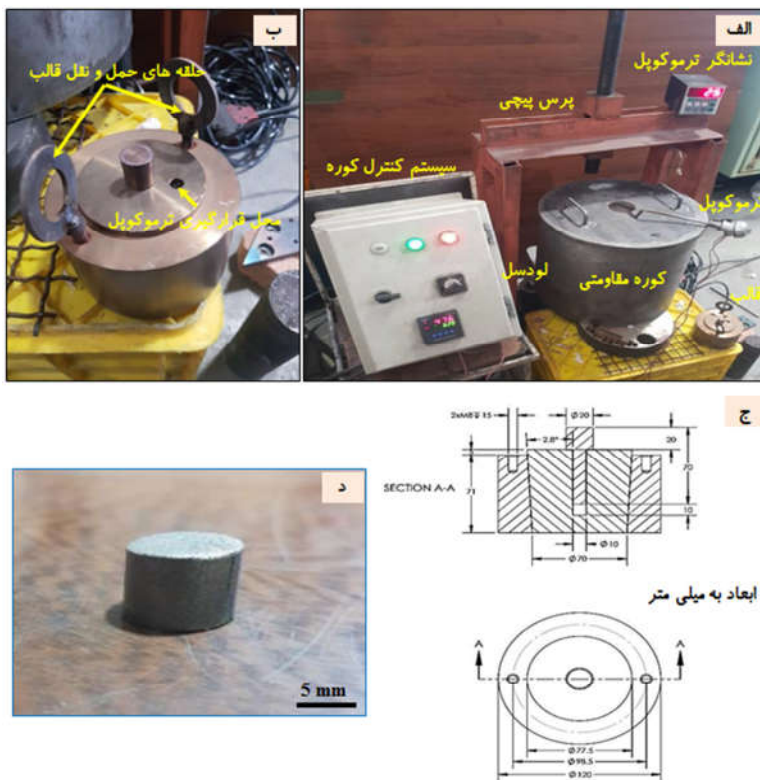
جدول ۱- عوامل و سطوح در نظر گرفته‌شده برای متغیرهای فرآوری

پودری نیمه‌جامد

ردیف	عوامل	سطوح
۱	مدت زمان اعمال فرآیند (دقیقه)	۵، ۱۰، ۱۵
۲	دمای فرآیند (درجه سلسیوس)	۶۰۰، ۶۱۰، ۶۲۰
۳	نانولوله کربنی (درصد وزنی)	۰، ۱، ۲

در پژوهش حاضر، از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای تهیه تصاویر ریزساختار نمونه‌ها با انجام برش شعاعی از مقطع نمونه‌ها استفاده گردید. لازم به ذکر است که مدل میکروسکوپ الکترونی ۷۰۵۹ و ساخت شرکت OXFORD است که در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه تبریز مستقر است. ریزساختار نمونه‌های حجمی ساخته‌شده با دستگاه میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند. برای بررسی ریزساختار، با توجه به عدم هدایت الکتریکی ذرات تقویتی پوشش‌دهی طلا پیش از تهیه تصاویر لازم می‌باشد. این روش با به‌کارگیری دستگاه لایه‌نشانی با بهره‌گیری از فرآیند فیزیکی رسوب بخار بر روی سطح پودرها صورت گرفت.

^۱ Differential scanning calorimetry (DSC)



شکل ۱- الف- تجهیزات آزمایشگاهی به کار رفته، ب- قالب مورد استفاده در تحقیق، ج- نقشه‌های ساخت قالب (ابعاد به میلی‌متر) و د- نمونه تولیدی با به‌کارگیری روش پودری نیمه‌جامد

۳- نتایج

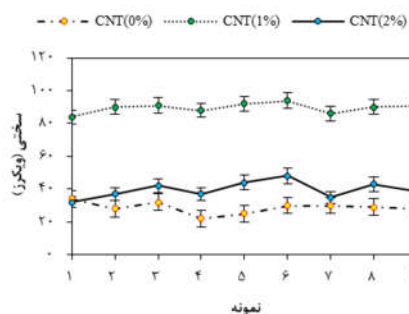
۳-۱- نتایج سختی‌سنجی

سختی را می‌توان یک مقیاس نسبی از استحکام موضعی محسوب نمود. با این وجود سختی نسبت به ناهمواری‌های سطح و فازی که فرورونده در آن قرار می‌گیرد، حساس است. برای بررسی میزان سختی، ۲۷ نمونه بر پایه روش طراحی آزمایش چند عاملی کامل تهیه شد که نتایج سختی‌سنجی در جدول ۲ آورده شده است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۲ می‌توان مشاهده نمود که با افزایش زمان فرآوری پودری نیمه‌جامد و دمای اعمال شده، روند صعودی برای مقادیر سختی وجود دارد؛ اما مهم‌ترین متغیر در نظر گرفته شده در این تحقیق، مقدار یا درصد نانولوله کربنی اضافه‌شده به زمینه فلزی نانوکامپوزیت است. نمودار تغییرات سختی با درصد‌های ۰، ۱ و ۲ درصد نانولوله کربنی در شکل ۲ آورده شده است. شماره نمونه‌ها از ۱ تا ۹ در شکل ۲ مربوط به سه دسته ۹ تایی آزمایش‌ها مطابق جدول ۲ می‌باشند.

با توجه به شکل (۲) می‌توان ملاحظه نمود که بیشترین مقدار سختی مربوط به نانوکامپوزیت CNT-1% می‌باشد. کمترین میزان سختی مربوط به آلیاژ پایه (کامپوزیت فاقد CNT) بوده و نانوکامپوزیت CNT-2% دارای سختی مابین نانوکامپوزیت CNT-1% و آلیاژ پایه می‌باشد. همان‌طور که بیان شد، مقادیر سختی به‌دست‌آمده برای نانوکامپوزیت CNT-2% کمی بیشتر از آلیاژ پایه است؛ بنابراین، برخلاف نسبت اختلاط، با افزایش درصد تقویتی مقدار سختی

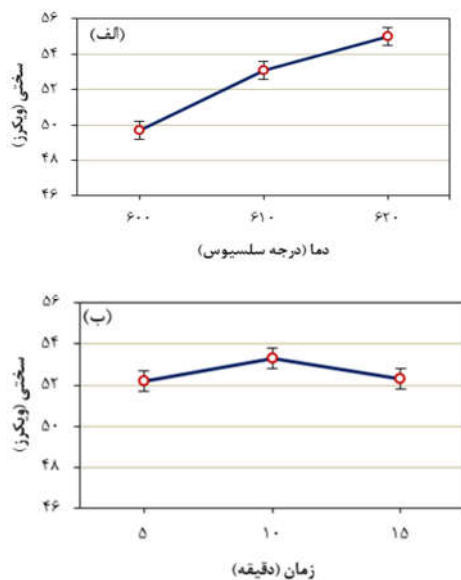
نانوکامپوزیت تهیه‌شده کاهش می‌یابد. افزایش مقدار سختی نانوکامپوزیت CNT-2% نسبت به کامپوزیت فاقد نانولوله کربنی بیانگر این است که تقویت‌کنندگی نانولوله کربنی به‌واسطه جلوگیری از حرکت نا به‌جایی‌ها و کاهش احتمالی چگالی در کامپوزیت اتفاق افتاده است.



شکل ۲- تغییرات میانگین سختی نمونه‌های کامپوزیت تهیه‌شده نسبت به درصد CNT

همچنین اندازه کوچک ذرات نانولوله کربنی، منجر به نفوذ راحت‌تر این ذرات به درون حفرات خالی فاز زمینه آلومینیومی می‌شود؛ بنابراین، می‌توان گفت که کاهش اندازه ذرات تقویت‌کننده در بارگذاری‌های بالا، منجر به تجمع آن‌ها بر روی سطح ذرات آلومینیوم با ساختار منظم می‌شود. این امر، سطح تماس بین ذرات فاز زمینه و نانولوله کربنی را

به بیان دیگر، با افزایش دما از ۶۰۰ به ۶۲۰ درجه سلسیوس اختلاف چندانی در مقادیر سختی به دست آمده برای ۲۷ نمونه مشاهده نمی شود و هر سه دمای مورد نظر روند یکسانی را نشان می دهند ولی به طور نسبی می توان ملاحظه نمود که با افزایش دما، سختی نمونه ها تا اندازه ای افزایش یافته و در نتیجه سطح سوم (دمای ۶۲۰ درجه سلسیوس) به عنوان دمای مؤثر انتخاب می گردد. نتیجه مشابهی در تحقیق وو و همکاران نیز مشاهده شد. این محققان گزارش نمودند که بیشترین سختی کامپوزیت تهیه شده با فرآوری پودری نیمه جامد در دمای ۶۲۰ درجه سلسیوس حاصل شده که تشکیل کاربیده ها در دماهای بالاتر بر پیوند سطح مابین زمینه آلومینیومی و نانولوله کربنی تأثیر گذار می باشد [۱۲]. همچنین، مدت زمان اعمال فشار نیز با افزایش از ۵ به ۱۵ دقیقه تغییرات شدیدی را نشان نمی دهد ولی با دقت در نمودار مشخص است که زمان فرآیند در سطح دوم (۱۰ دقیقه) تأثیر مثبتی بر سختی نمونه ها دارد. در تحقیق سیموس^۱ و همکاران نیز مشاهده شد که مدت زمان اعمال فشار بیش از ۱۵ دقیقه، سبب افزایش تجمع نانولوله های کربنی شده و مقاومت مکانیکی نانوکامپوزیت های AI-MWCNTs را به دلیل آسیب دیدن آن ها، کاهش داده و اتصال نانولوله های کربنی به همدیگر در مدت زمان طولانی تر کاهش می یابد [۲۳]. در پژوهش حاضر، به دلیل اختلاف ناچیز مابین زمان ۱۰ و ۱۵ دقیقه در میزان سختی و استحکام نمونه، بهتر است مدت زمان اعمال فرآیند در زمان کمتری صورت پذیرد و می توان بیان نمود که زمان ۱۰ دقیقه نسبت به دو زمان دیگر (۵ و ۱۵ دقیقه) مدت زمان مناسب اعمال فشار همراه با سختی بالای نمونه است.



افزایش داده و منجر به افزایش استحکام پیوندی آن ها می گردد [۱۵]. با افزایش استحکام پیوندی در نانوکامپوزیت، سختی آن افزایش می یابد. در پژوهش حاضر، با توجه به ابعاد نانومتری فاز تقویت کننده، میزان استحکام پیوندی و سختی تا افزودن یک درصد نانولوله کربنی مطلوب ارزیابی شده است. در این راستا، با افزایش درصد فاز تقویت کننده بر روی فاز زمینه، احتمال کلوخه های ذرات نانولوله کربنی و قفل شدن این ذرات به هم باعث کاهش نفوذ آن ها به فاز زمینه می شود [۱۹]. در شکل ۳ نمودارهای به دست آمده برای بررسی تأثیر عوامل مدت زمان اعمال فشار، دمای نیمه جامد و درصد نانولوله کربنی بر میزان سختی و تعیین

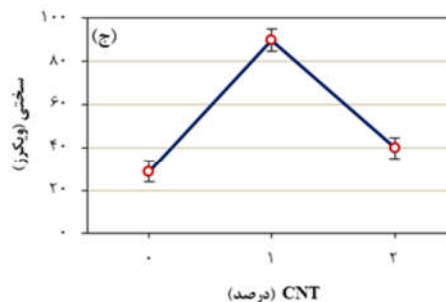
جدول ۲- مقادیر میانگین سختی تعیین شده برای نمونه های کامپوزیت AI7075-CNT

ردیف	دما (درجه سلسیوس)	زمان (دقیقه)	CNT (درصد)	سختی (ویکرز)
۱	۶۰۰	۵	۰	۳۴
۲	۶۱۰	۵	۰	۲۸
۳	۶۲۰	۵	۰	۳۲
۴	۶۰۰	۱۰	۰	۲۲
۵	۶۱۰	۱۰	۰	۲۵
۶	۶۲۰	۱۰	۰	۳۰
۷	۶۰۰	۱۵	۰	۳۰
۸	۶۱۰	۱۵	۰	۲۹
۹	۶۲۰	۱۵	۰	۲۸
۱۰	۶۰۰	۵	۱	۸۴
۱۱	۶۱۰	۵	۱	۹۰
۱۲	۶۲۰	۵	۱	۹۱
۱۳	۶۰۰	۱۰	۱	۸۸
۱۴	۶۱۰	۱۰	۱	۹۲
۱۵	۶۲۰	۱۰	۱	۹۴
۱۶	۶۰۰	۱۵	۱	۸۶
۱۷	۶۱۰	۱۵	۱	۹۰
۱۸	۶۲۰	۱۵	۱	۹۱
۱۹	۶۰۰	۵	۲	۳۲
۲۰	۶۱۰	۵	۲	۳۷
۲۱	۶۲۰	۵	۲	۴۲
۲۲	۶۰۰	۱۰	۲	۳۷
۲۳	۶۱۰	۱۰	۲	۴۴
۲۴	۶۲۰	۱۰	۲	۴۸
۲۵	۶۰۰	۱۵	۲	۳۵
۲۶	۶۱۰	۱۵	۲	۴۳
۲۷	۶۲۰	۱۵	۲	۳۹

سطوح مؤثر نشان داده شده است. در شکل ۳ تغییرات هر متغیر بر پایه میانگین مقادیر سختی به دست آمده در جدول ۲ در دما، زمان و درصد نانولوله کربنی مختلف ترسیم شده است و مربوط به سطح خاصی از این متغیرها نمی باشند.

با دقت در نمودارهای به دست آمده برای متغیرهای مؤثر بر سختی نمونه های کامپوزیتی تهیه شده می توان دریافت که دما و زمان فرآوری بر میزان سختی نمونه ها تأثیر یکنواختی داشته و سطوح در نظر گرفته شده، اختلاف چندانی را برای سختی نمونه ها نشان نمی دهند.

¹ Simoes



شکل ۳- نمودارهای تک عاملی متغیرهای مؤثر بر میانگین مقادیر سختی به دست آمده از جدول ۲، الف- دمای فرآوری، ب- مدت زمان اعمال فشار و ج- درصد نانولوله کربنی

افزایش درصد نانولوله کربنی از صفر به یک درصد همراه با افزایش سختی نمونه‌ها بوده ولی با افزایش درصد حجمی فاز تقویت‌کننده به دو درصد، مقدار سختی کاهش یافته و به مقادیر سختی نمونه‌های کامپوزیتی آلیاژ پایه نزدیک‌تر می‌شود. علت این امر عدم امکان نفوذ مناسب و مطلوب نانولوله کربنی در بستر زمینه بوده که در نتیجه، پیوندی مطلوب مابین تقویت‌کننده و زمینه آلومینیومی حاصل نمی‌گردد. عدم استحکام پیوندی مابین ذرات نانولوله کربنی و فاز زمینه با افزایش درصد تقویتی و پیوند وان در والس بین تقویت‌کننده‌ها عامل اصلی در کاهش سختی می‌باشند [۲۴]. چن و همکاران نیز مشاهده نمودند که استحکام کششی کامپوزیت $Al_{2024}-0.1\%GNP$ بیش از ۴۱ درصد نسبت به کامپوزیت زمینه آلومینیومی افزایش یابد [۱۴]. همچنین، وو و همکاران نیز ملاحظه نمودند که با یک درصد وزنی نانولوله کربنی، به‌طور یکنواخت در سراسر آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ پراکنده شده و در پایان استحکام و سختی بالاتری نسبت به نمونه آلیاژ پایه و یا حاوی درصد بالاتر نانولوله کربنی حاصل می‌گردد [۱۲]. آرانکه و همکاران نیز گزارش نمودند که با افزودن درصدی مختلف نانولوله کربنی به آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، مقاومت در برابر سایش نانوکامپوزیت در میزان متوسط در نظر گرفته شده برای نانولوله

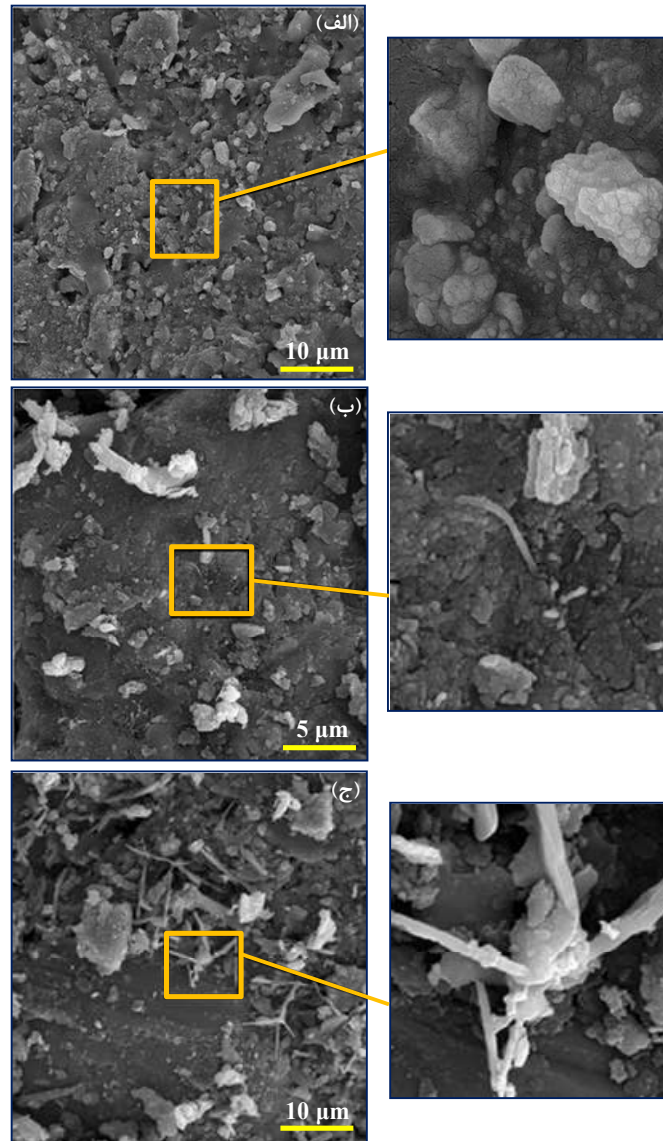
کربنی (۰/۵ درصد وزنی) به دلیل پراکندگی یکنواخت فاز تقویت‌کننده افزایش یافته است. افزون بر این، با افزایش نانولوله‌های کربنی چند جداره از ۰/۵ به ۰/۷۵ درصد وزنی، مقاومت در برابر سایش کامپوزیت ثابت باقی مانده است [۱۶].

در پژوهش حاضر نیز با توجه به اینکه میزان سختی نمونه ۱%-CNT به مقدار قابل توجهی نسبت به نمونه آلیاژ آلومینیوم فاقد تقویت‌کننده و نمونه 2%-CNT افزایش یافته است، مقدار مناسب فاز تقویت‌کننده یک درصد وزنی در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین، با توجه به نمودارهای موجود در شکل ۳ می‌توان عنوان نمود که حالت بهینه برای متغیرهای فرآوری با رویکرد استحکام مکانیکی بالاتر شامل شرایط عملیاتی دمای ۶۲۰ درجه سلسیوس، مدت زمان اعمال فشار ۱۰ دقیقه و یک درصد وزنی از نانولوله کربنی می‌باشد که در مقایسه با نتایج دیگر تحقیقات هم مورد صحه‌گذاری قرار گرفته است.

۳-۲- بررسی تأثیر درصد مختلف نانولوله کربنی بر ریزساختار کامپوزیت‌ها

بررسی ریزساختار نمونه‌های کامپوزیتی تهیه‌شده از اولویت بالایی برخوردار است چراکه ریخت‌شناسی پودرها تأثیر مستقیمی بر ریزساختار و خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته‌شده دارد. همچنین، با توجه به نتایج سختی‌سنجی، مهم‌ترین متغیر مؤثر بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تهیه‌شده، درصد نانولوله کربنی است. در شکل ۴ تصاویر SEM تهیه‌شده جهت ارزیابی تأثیر درصد نانولوله کربنی بر ریزساختار نمونه‌ها آورده شده است.

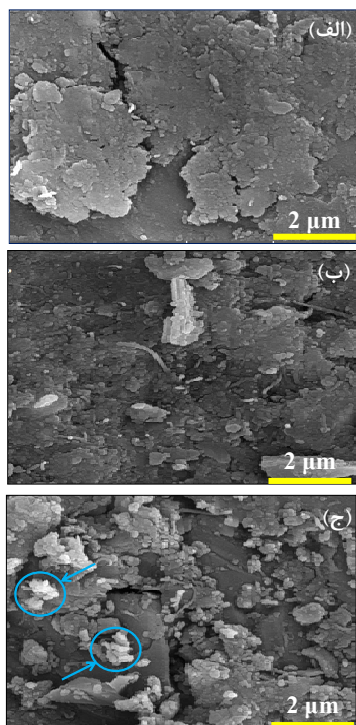
در شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود که کامپوزیت با زمینه آلومینیومی دارای تجمع فشرده و متراکمی از ذرات پودر آلومینیومی در سطح آلیاژ است که در شکل بزرگنمایی شده در سمت راست نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴-ب) مشاهده می‌شود که نانولوله کربنی به‌عنوان فاز تقویت‌کننده در فاز زمینه آلومینیومی کاملاً نفوذ کرده و تجمعی از نانوذرات در سطح پودر آلومینیومی وجود ندارد. این



شکل ۴- تصاویر SEM نمونه کامپوزیتی و تصاویر بزرگنمایی شده الف- آلیاژ پایه (فاقد نانولوله کربنی)، ب- 1%-CNT و ج- 2%-CNT در دمای ۶۱۰ درجه سلسیوس و مدت زمان اعمال فشار ۱۰ دقیقه

لازم به ذکر است که پراکندگی یکنواخت نانولوله‌های کربنی در داخل زمینه چالش‌های بسیاری ایجاد می‌کند زیرا آن‌ها به خاطر نیروهای قوی واندروالسی تمایل به جمع شدن و در هم تنیده شدن دارند. افزون بر این، پراکندگی یکنواخت نانولوله‌های کربنی تنها یک مشکل هندسی نیست بلکه به رویکرد مرتبط با روش فرآوری، متمایز از ترکیبات آن‌ها و جاسازی آن‌ها در زمینه بدون کلوخه‌ای شدن مربوط می‌شود. افزایش خصوصیات مکانیکی، گرمایی و الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها به دلیل مشکلات مرتبط با پراکندگی یکنواخت و ادغام خوب آن‌ها در زمینه بشدت محدود شده است. در تحقیقات صورت گرفته، هیچ روش قابل توجهی برای دستیابی به پراکندگی کامل یا ۱۰۰ درصد یکنواخت نانولوله‌های کربنی در زمینه‌های فلزی مختلف وجود ندارد. پراکندگی

امر بیانگر مؤثر بودن فرآیند تهیه نانوکامپوزیت و توزیع مناسب و یکنواخت نانولوله کربنی در بستر فاز زمینه می‌باشد. همچنین، در تصویر بزرگنمایی شده در سمت راست شکل به روشنی می‌توان نفوذ کامل نانولوله کربنی به فاز زمینه آلومینیومی را مشاهده نمود که حاکی از استحکام پیوندی مابین فاز زمینه و فاز تقویت‌کننده است. در تصاویر SEM به‌دست‌آمده برای نمونه نانوکامپوزیتی 1%-CNT نیز حالت تجمع ذرات آلومینیومی ملاحظه می‌شود که در مقایسه با نمونه کامپوزیتی فاقد تقویت‌کننده از میزان تجمع ذرات در سطح نمونه به مقدار قابل توجهی کاسته شده است (مقایسه تصاویر بزرگنمایی شده قسمت الف و ب). این امر را می‌توان به تأثیر ایجاد پیوند مابین نانوذرات با فاز زمینه در اثر فشار اعمال‌شده در فرآوری پودری نیمه‌جامد مرتبط دانست زیرا تشکیل پیوند و نفوذ نانولوله کربنی در بستر فاز زمینه باعث پراکندگی مناسب و یکنواخت آن شده است.



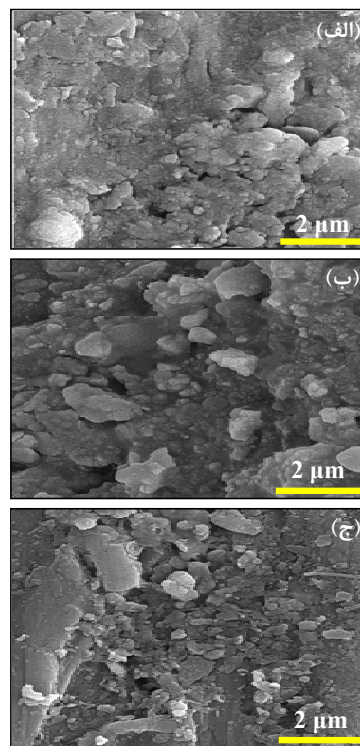
شکل ۶- تصاویر SEM نانوکامپوزیت 1%-CNT با مدت زمان اعمال فشار ۱۰ دقیقه در دمای الف- ۶۰۰، ب- ۶۱۰ و ج- ۶۲۰ درجه سلسیوس

حجمی نانولوله کربنی به دو درصد، حالت اشباع‌شدگی و یا کلوخه‌ای شدن آن‌ها بر سطح آلومینیم اتفاق افتاده و نفوذ و یا انتشار در بستر آلومینیومی با موفقیت صورت نگرفته است. همچنین، به دلیل عدم پیوند مناسب مابین نانولوله کربنی و آلومینیم، ذرات آلومینیومی در شبکه‌ای از تارهای به هم تنیده نانولوله کربنی به دام افتاده و در سطح بستر باقی مانده‌اند. در هم گره‌شدن نانولوله‌های کربنی به روشنی در این تصویر قابل مشاهده است. این امر سبب می‌شود که فاز زمینه آلومینیومی با فاز تقویت‌کننده، منسجم نشده و استحکام نانوکامپوزیت افزایش نیابد. نتایج سختی‌سنجی نیز مؤید این مطلب است که استحکام و سختی نمونه 2%-CNT تغییر محسوسی نسبت به کامپوزیت با زمینه آلومینیومی (فاقد نانولوله کربنی) ندارد.

با توجه به تصاویر SEM می‌توان گفت که ذرات تقویتی به صورت همگن مابین ذرات فاز زمینه توزیع شده‌اند که توزیع و یا پراکندگی یکنواخت نانولوله‌های کربنی با یک درصد حجمی نسبت به دو مورد دیگر به خوبی صورت گرفته و با پراکندگی یکنواخت نانولوله‌ها در بستر آلومینیومی، سختی نانوکامپوزیت نیز افزایش یافته است زیرا که تقویت‌کنندگی نانولوله کربنی در یک درصد به خوبی عملی شده است.

۳-۳- بررسی تأثیر دما بر ریزساختار کامپوزیت‌ها

برای بررسی تأثیر دما بر ریزساختار کامپوزیت‌ها، تصاویر SEM نمونه‌های مجزای تولید شده در دماهای ۶۰۰، ۶۱۰ و ۶۲۰ درجه سلسیوس بررسی شده است. با بررسی تصاویر به دست آمده در شکل ۵ مشاهده می‌شود که برای دماهای ۶۰۰، ۶۱۰ و ۶۲۰ درجه سلسیوس نمونه‌های کامپوزیت پایه، ساختار یکنواخت و همگنی نشان می‌دهد. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که در دماهای مختلف، در نمونه

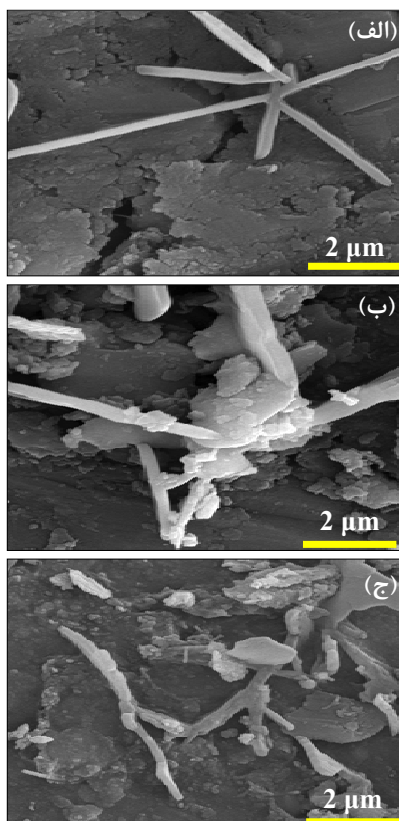


شکل ۵- تصاویر SEM نانوکامپوزیت آلیاژ پایه با مدت زمان اعمال فشار ۱۰ دقیقه در دماهای الف- ۶۰۰، ب- ۶۱۰ و ج- ۶۲۰ درجه سلسیوس

یکنواخت به عوامل مختلفی از جمله نوع زمینه‌ها، نسبت ابعاد نانولوله‌های کربنی، محتوای تقویت‌کننده، متغیرهای فرآیند و روش‌های آماده‌سازی بستگی دارد [۲۵]. در واقع، هدف اصلی در رسیدن به پراکندگی مطلوب، کاهش تراکم نانولوله‌های کربنی و امکان توزیع یکنواخت رشته‌های متمایز نانولوله‌های کربنی در سراسر زمینه بدون از میان بردن و تغییر یکپارچگی آن‌هاست. پراکندگی یکنواخت نانولوله‌های کربنی در داخل زمینه باعث ایجاد پیوند سطحی خوبی در بین زمینه و نانولوله‌های کربنی می‌شود که توزیع تنش یکنواخت‌تر و انتقال بار مناسب به شبکه نانو پرکننده‌ها را تضمین می‌کند. افزون بر این، طبق مطالعات موجود، پراکندگی یکنواخت نانولوله‌های کربنی در داخل زمینه و پیوند سطحی خوب بین زمینه و نانولوله‌های کربنی، سبب بهبود استحکام و سختی نمونه‌ها می‌گردد [۲۶].

تصاویر SEM نشان داده شده در شکل (۴-ج) بیانگر تجمع شدید نانولوله کربنی بر سطح فاز زمینه آلومینیومی است. با افزایش درصد

در واقع، با افزودن نانولوله کربنی به فاز زمینه آلومینیم ۷۰۷۵ به مقدار بیشتر (دو درصد) انسجام نانوکامپوزیت تهیه شده در اثر عدم اتصال مناسب نانولوله به زمینه کاهش یافته و این امر سبب افت سختی نانوکامپوزیت تهیه شده می شود.



شکل ۸- تصاویر SEM نانوکامپوزیت CNT-2% با مدت زمان اعمال فشار ۱۰ دقیقه در دمای الف- ۶۰۰، ب- ۶۱۰ و ج- ۶۲۰ درجه سلسیوس

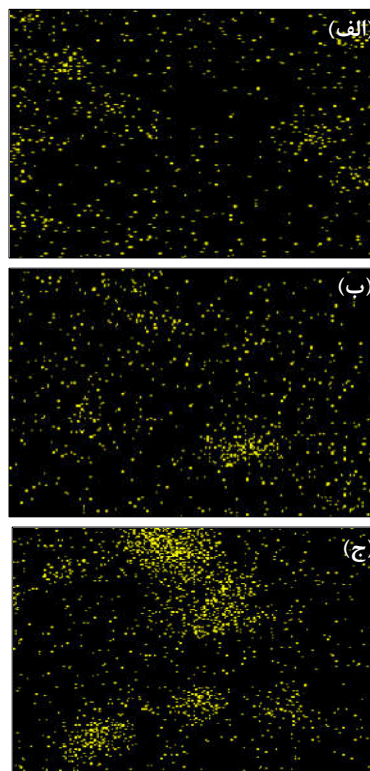
۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، با به کارگیری فرآوری پودری نیمه جامد اقدام به تهیه نمونه های نانوکامپوزیتی Al7075-CNT گردید. نتایج حاصل از ارزیابی سختی و ریزساختار نمونه ها به شرح زیر است:

- سختی نانوکامپوزیت 1%-CNT نسبت به کامپوزیت پایه افزایش یافت اما نانوکامپوزیت 2%-CNT دارای سختی مابین نانوکامپوزیت 1%-CNT و آلیاژ پایه است. این نتیجه توسط بررسی ریزساختار نمونه با SEM و مقایسه با تحقیقات قبلی مورد صحت گذاری قرار گرفت.
- مدت زمان و دمای انجام فرآیند بر سختی نمونه ها تأثیر یکنواختی دارند به طوری که با افزایش دمای فرآوری، افزایش محسوسی در سختی نمونه ها صورت نگرفت. این نتیجه نیز با بررسی ریزساختار نمونه ها و نیز مقایسه با تحقیقات قبلی مورد صحت گذاری قرار گرفت.
- افزایش مدت زمان انجام فرآیند تغییرات شدیدی را در سختی نمونه ها نشان نداد.
- دمای ۶۲۰ درجه سلسیوس، مدت زمان اعمال فشار ۱۰ دقیقه و یک درصد وزنی از نانولوله کربنی برای رسیدن به سختی دلخواه انتخاب گردیدند.

نانوکامپوزیت 1%-CNT تغییر چندانی در ریزساختار حاصل در دمای ۶۰۰ و ۶۱۰ درجه سلسیوس مشاهده نمی شود و ساختار یکنواخت و همگنی از نانوکامپوزیت وجود دارد که نانولوله کربن در فاز زمینه نفوذ کرده است. ولی در دمای ۶۲۰ درجه سلسیوس تجمع کلوخه ها در مناطق نشان داده شده در شکل مشاهده می شود که در دمای ۶۰۰ و ۶۱۰ درجه سلسیوس وجود ندارد. در این دما نیز همانند دو دمای قبلی، نفوذ نانولوله به فاز زمینه به خوبی صورت گرفته است که سبب بهبود سختی نمونه ها شده است.

به منظور بررسی دقیق تر همگن بودن ساختار و نحوه توزیع فاز تقویتی، نقشه عنصری^۱ (EDS-map) از نانوکامپوزیت 1%-CNT تولید شده در مدت زمان اعمال فشار ۱۰ دقیقه و در دماهای فرآوری مختلف تهیه گردید که نتایج در شکل ۷ نشان داده شده است. برای درک بهتر توزیع فاز تقویتی، نقشه عنصری کربن به عنوان نماینده فاز CNT در زمینه آلومینیم تهیه گردید. مشاهده می گردد که در دماهای ۶۰۰ و ۶۱۰ درجه سلسیوس عنصر کربن به صورت یکنواخت در زمینه آلومینیم پراکنده شده است اما در دمای ۶۲۰ درجه سلسیوس تجمع کلوخه ها مشاهده گردید. در شکل ۸ مشاهده می شود که برای دماهای مختلف فرآوری، در نمونه نانوکامپوزیتی با 2%-CNT ارتباط مؤثری مابین زمینه آلومینومی و نانولوله کربنی وجود ندارد. نانولوله ها به صورت کلوخه ای و در هم تنیده مشاهده می شوند که ذرات پودر آلومینیم نیز در کنار این ساختار درهم گره خورده مشاهده می شود.



شکل ۷- آنالیز EDS-map عنصر کربن در نانوکامپوزیت 1%-CNT با مدت زمان اعمال فشار ۱۰ دقیقه در دمای الف- ۶۰۰، ب- ۶۱۰ و ج- ۶۲۰ درجه سلسیوس

^۱ Energy dispersive spectroscopy (EDS)

fabricated by semi-solid powder metallurgy. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 646, No. pp. 306-314, 2015.

[14] Chen L., Qi Y., Fei Y., Liu Y., and Du Z., GNP-Reinforced Al2024 Composite Fabricated through Powder Semi-Solid Processing. *Materials Transactions*, Vol. 61, No. 7, pp. 1239-1246, 2020.

[15] Ferreira L., Robert M., and Bayraktar E. Effect of operational parameters in the semi-solid processing of Al/SiC composites from machining chips. in *ECCM16—16th European Conference on Composite Materials, Seville, Spain*. 2014.

[16] Aranke O., Gandhi C., Dixit N., and Kuppam P., Influence of multiwall carbon nanotubes (MWCNT) on wear and coefficient of friction of aluminium (Al 7075) metal matrix composite. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 2, pp. 7748-7757, 2018.

[17] Luo X., Yang S., Li M., Tang Z., Wang S., Huang B., The Properties Evolution of Medical Mg–Zn Alloys Prepared by Semi-solid Moulding. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 74, No. 12, pp.3063-3073, 2021.

[18] Fekri Dolatabad P., Pouyafar V., and Meshkabi R., Fabrication of Al7075-MWCNT Composite Powder by Recycling Aluminum Alloy Chips Via High Energy Milling and Alloying. *Journal of Advanced Materials and Processing*, Vol. 9, No. 3, pp. 55-66, 2021.

[۱۹] آقاجانی س.، بررسی تجربی تأثیر درصد بارگناری بالای تقویت‌کننده ($Al_{7075}-Al_{2024}$) بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت ساخته شده به روش شکل‌دهی نیمه‌جامد پودری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، ۱۳۹۶.

[20] Huang H.-J., Chen T.-J., Ying M., and Yuan H., Microstructural evolution during solution treatment of thixoformed AM60B Mg alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, No. 4, pp. 745-753, 2011.

[21] Chen T., Lü W., Ma Y., Huang H., and Hao Y., Semisolid microstructure of AM60B magnesium alloy refined by SiC particles. *International Journal of Materials Research*, Vol. 10, No. 12, pp. 1459-1467, 2011.

[22] ASTM E384, Standard test method Microindentation Hardness of Materials, 2005. Vol. No. pp .

[23] Simões S., Viana F., Reis M. A., and Vieira M. F., Influence of dispersion/mixture time on mechanical properties of Al–CNTs nanocomposites. *Composite Structures*, Vol. 126, No. pp. 114-122, 2015.

[24] Salas W., Alba-Baena N., and Murr L., Explosive Shock-Wave consolidation of aluminum Powder/Carbon nanotube aggregate mixtures: optical and electron metallography. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 38, No. 12, pp. 2928-2935, 2007.

[25] Soni S. K., Thomas B., and Kar V. R., A comprehensive review on CNTs and CNT-reinforced composites: syntheses, characteristics and applications. *Materials Today Communications*, Vol. No. pp. 101546, 2020.

[26] Wang H., Zhang Z.-H., Hu Z.-Y., Song Q., Yin S.-P., Kang Z., and Li S.-L., Improvement of interfacial interaction and mechanical properties in copper matrix composites reinforced with copper coated carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 715, No. pp. 163-173, 2018.

• برخلاف ساختار یکنواخت کامپوزیت پایه و نمونه 1%-CNT، در نمونه 2%-CNT تجمع شدید نانولوله‌های کربنی بر سطح زمینه آلومینیومی مشاهده گردید. این مشاهدات ریزساختاری با نتایج سختی‌سنجی مطابقت دارد.

• بیشترین مقدار سختی مربوط به نمونه 1%-CNT با مقدار ۹۴ ویکرز و کمترین مقدار آن مربوط به نمونه فاقد نانولوله کربنی با مقدار ۲۲ ویکرز است. بررسی کمی نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که درصد نانولوله کربنی دارای بیشترین تأثیر بر مقدار سختی نمونه بوده به‌طوری‌که در نمونه 1%-CNT، مقدار سختی نمونه بیش از دو برابر نسبت به نمونه فاقد نانولوله کربن افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش دما به میزان ۱۰ درصد و مدت زمان اعمال فشار به مقدار دو درصد سختی نمونه‌های 1%-CNT نسبت به نمونه‌های فاقد نانولوله کربن را افزایش می‌دهد.

۵- مراجع

[1] Min G., Lee J.-M., Kang S.-B., and Kim H.-W., Evolution of microstructure for multilayered Al/Ni composites by accumulative roll bonding process. *Materials Letters*, Vol. 60, No. 27, pp. 3255-3259, 2006.

[2] Rezaei M. R., Toroghinejad M. R., and Ashrafzadeh F., Production of nano-grained structure in 6061 aluminum alloy strip by accumulative roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 529, No. pp. 442-446, 2011.

[3] Rezayat M., Akbarzadeh A., and Owghadi A., Production of high strength Al–Al₂O₃ composite by accumulative roll bonding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 2, pp. 261-267, 2012.

[4] Pang Y., Lin P., Sun Q., Zhang Z., and Liu D., Experimental and numerical analyses of 45 steel during three dimensional severe plastic deformation (3D-SPD). *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 1-11, 2020.

[5] Roy S., Nataraj B., Suwas S., Kumar S., and Chattopadhyay K., Accumulative roll bonding of aluminum alloys 2219/5086 laminates: Microstructural evolution and tensile properties. *Materials & Design (1980-2015)*, Vol. 36, No. pp. 529-539, 2012.

[6] Ji S., Fan Z., and Bevis M., Semi-solid processing of engineering alloys by a twin-screw rheomoulding process. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 299, No. 1-2, pp. 210-217, 2001.

[7] Kirkwood D. H., Suéry M., Kapranos P., Atkinson H. V., and Young K. P., *Semi-solid processing of alloys*. Springer, 2010.

[8] Guo M. T. and Tsao C.-Y., Tribological behavior of self-lubricating aluminium/SiC/graphite hybrid composites synthesized by the semi-solid powder-densification method. *Composites science and technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 65-74, 2000.

[9] Yasue K., Yu G., Wen C., and Yamada Y., Elemental blended powders semisolid forming of Ti-Al based alloys. *Journal of materials science*, Vol. 35, No. 23, pp. 5927-5932, 2000.

[10] Young R. and Clyne T., A powder-based approach to semisolid processing of metals for fabrication of die-castings and composites. *Journal of materials science*, Vol. 21, No. 3, pp. 1057-1069, 1986.

[11] Speth M., Liewald M., Riedmüller K. R., Schomer L., Manufacturing of Hybrid Al-Cu-Heatsinks by Combining Powder Pressing with Thixoforming. *Solid State Phenomena*, Vol. 327, pp. 231-237, 2022.

[12] Wu Y. and Kim G.-Y., Carbon nanotube reinforced aluminum composite fabricated by semi-solid powder processing. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 8, pp. 1341-1347, 2011.

[13] Chen C., Guo L., Luo J., Hao J., Guo Z., and Volinsky A. A., Aluminum powder size and microstructure effects on properties of boron nitride reinforced aluminum matrix composites