



بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت Al2024-CNT فرآوری شده به روش متالورژی پودر پولک

فرشید ریخته‌گر^۱، سعید شبستری^{۲*}، حسن ثقفیان^۳

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۲- استاد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۳- دانشیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
* Shabestari@iust.ac.ir، ۱۶۸۴۶۱۳۱۱۴، صندوق پستی

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>امروزه ساخت و مطالعه نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیم با مقاوم‌ساز نانوتیوب کربن مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. روش‌های مختلفی برای فرآوری این نوع نانوکامپوزیت‌ها استفاده شده است. اما، روش‌های بر پایه متالورژی پودر با توجه به پایین‌تر بودن دما و کنترل بهتر فرآیند، بیشتر مورد توجه بوده است. در تحقیق حاضر با هدف ساخت نانوکامپوزیت با زمینه آلومینیم ۲۴ و افزودن ۱/۵ wt.% CNT، از روش متالورژی پودر پولک با سنتز تر در محیط سیال برای تولید پودر کامپوزیت استفاده شده است. سپس با استفاده از تفجوشی اولیه پودر با روش پرس سرد و تفجوشی بدون فشار در دمای ۵۵۰ °C، قرص‌های اولیه از آلیاژ Al2024 و کامپوزیت Al2024-CNT ساخته شد و تحت عملیات اکستروژن داغ قرار گرفت تا مفتول نهایی به قطر ۱۰ mm حاصل شود. در ادامه محصولات با استفاده از آزمون‌های کشش، فشار، سختی و چگالی سنجی، XRD و رامان مورد مطالعه قرار گرفتند. با بهره‌گیری از مزایای روش تر، توزیع یکنواخت CNT در زمینه Al2024 همراه با حفظ کامل آن‌ها در محیط سیال، با استفاده از FE-SEM مشاهده شد. در نمونه Al2024-1.5wt.%CNT، استحکام تسلیم و استحکام نهایی به میزان ۲۸ درصد در مقایسه با نمونه Al2024-O و به مقدار ۲۰ درصد در استحکام تسلیم و ۱۵ درصد در استحکام نهایی نسبت به نمونه Al2024-T6 افزایش یافت. پس از متراکم سازی بهینه، چگالی نسبی در نمونه‌های کامپوزیت Al2024-CNT تا ۹۵/۶ درصد، میزان سختی تا ۹۰ HB و استحکام فشاری تا ۵۴۷ MPa بهبود یافت. همچنین علاوه بر فازهای بین فلزی Al₂Cu و Al₂CuMg در نمونه‌های آلیاژی، وجود فاز کاربیدی Al₄C₃ پس از عملیات تفجوشی در نمونه کامپوزیتی اثبات شد.</p>	<p>دریافت: ۹۵/۲/۱۷ پذیرش: ۹۵/۵/۱۴</p> <p>کلیدواژگان: نانوکامپوزیت روش تر نانوتیوب کربن توزیع همگن خواص مکانیکی</p>

Investigation of microstructure and mechanical properties of Al2024-CNT nanocomposite produced by flake powder metallurgy process

Farshid Rikhtegar, Saeed Shabestari*, Hassan Saghafian

Center of Excellence for High Strength Alloys technology (CEHSAT), School of Metallurgy and Materials Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran
*P.O.B. 1684613114, Tehran, Iran, Shabestari@iust.ac.ir

Keywords
Nanocomposite
Slurry-based method
Carbon nanotube
Homogeneous dispersion
Mechanical properties

Abstract
Nowadays, manufacturing of carbon nanotube reinforced aluminium matrix nanocomposites have been studied by many researchers. Different techniques have been used for possessing of Al-CNT nanocomposites. But, the powder metallurgy methods have been more attractive because of the lower temperature and better control of process. In the current research, the flake powder metallurgy route was used as a slurry based method to produce Al2024-CNT nanocomposite with 1.5wt.% CNT as reinforcement. Then, the initial compacted billets of Al2024 alloy and Al2024-CNT composites were produced by cold pressing of powders. They were sintered at 550 °C and the billets were hot extruded to produce rods with 10 mm in diameter. The produced samples were investigated by means of tension, compression, hardness, density measurement, XRD, and Raman tests. The uniform dispersion of CNTs within Al2024 powder was observed using FE-SEM. It was related to the merits of wet synthesis of composite powder. In Al2024-CNT sample, the yield and ultimate strength was increased about 28% in comparison with Al2024-O; It was also increased about 20% in yield strength and 15% in tensile strength compared with Al2024-T6 sample. After optimum sintering process, the relative density, hardness, and compressive strength of Al2024-CNT nanocomposite have been increased through hot extrusion to 95.6%, 90 HB, and 547 MPa, respectively. In addition to Al₂Cu and Al₂CuMg intermetallics in alloyed samples, Al₄C₃ carbide phase was proved to be formed after sintering in composite specimen.

۱- مقدمه

با توجه به گستردگی زمینه‌های مورد نیاز جهت تحقیق بیشتر، انجام مطالعات در برخی از موارد فوق به‌عنوان انگیزه اصلی پژوهش حاضر مطرح بوده تا در داخل کشور نیز بسترهای مطالعاتی اولیه فراهم شده و زمینه‌ساز ورود به این حوزه از نانو فناوری شود.

در مرحله اول این پژوهش، تمرکز اصلی بر دست‌یابی به توزیع بهینه نانوتیوب‌ها در زمینه آلومینیم آلیاژی ۲۰۲۴ با استفاده از روش تر به‌صورت کلی متالورژی پودر پولک (مشمتمل بر پنج مرحله آماده‌سازی) بوده است. روش تر با توجه به ویژگی‌های مثبت آن شامل حفظ ساختار نانوتیوب‌ها در طول فرآیند و نیز دست‌یابی به توزیع یکنواخت CNT در نقاط مختلف زمینه، به‌عنوان روشی کلیدی با مطالعه اثر PH در تشکیل سوسپانسیون نهایی مورد استفاده قرار گرفته است. در مرحله دوم پس از انجام کامپوزیت‌سازی، فرآیند ساخت قطعه نهایی با استفاده از فشردن‌سازی و تفجوشی بهینه همراه با اکسترورژن داغ انجام پذیرفت.

در نهایت، برای انجام مشخصه‌یابی محصولات آلیاژی و کامپوزیتی در طول فرآیند، از آزمون‌های تفرق اشعه ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی با تفنگ انتشار میدانی (FE-SEM)، رامان، چگالی سنجی، سختی سنجی، کشش و فشار استفاده شده و نتایج برای زمینه فلزی آلیاژی در دو حالت عملیات حرارتی شده AI2024-O و AI2024-T6 بدون مقاوم‌ساز CNT و نانوکامپوزیت AI2024-CNT مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت.

۲- آزمایش و روش تحقیق

در این پژوهش از نانوتیوب کربن چنددیواره الیاف کوتاه استفاده شده است که مشخصات هندسی و ساختاری آن در جدول ۱ ملاحظه می‌شود. به‌منظور خالص‌سازی و ایجاد عامل کربوکسیل (-COOH) بر جدار خارجی CNT، از عملیات اسیدشویی در اسید نیتریک غلیظ ۶۵ درصد به مدت ۶ ساعت در دمای ۱۲۰ °C استفاده شده و پس از شستشو با آب مقطر و رسیدن به pH=۷، نانوتیوب‌ها خشک شده و برای فرآیند کامپوزیت‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پودر آلومینیم آلیاژی ۲۰۲۴ با اندازه فراوانی حداکثر $100 < D < 65 \mu m$ در فرآیند کامپوزیت‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیب شیمیایی پودر آلیاژی زمینه پس از انجام آنالیز طیف سنجی جرمی در جدول ۲ ملاحظه می‌شود. ریزساختار مواد اولیه ساخت نانوکامپوزیت در شکل ۱ و منحنی رامان CNT-COOH در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی نانوتیوب کربن اولیه

نوع / مشخصه	خلوص (%)	چگالی (g/cm ³)	قطر خارجی (nm)	قطر داخلی (nm)	طول (μm)	روش فرآوری
CNT	> ۹۰	۲/۱	۱۰-۲۰	۲-۶	۰/۱-۲	CCVD

جدول ۲ ترکیب شیمیایی پودر آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴

عنصر	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Al
درصدوزنی (wt.%)	۳/۲۳	۱/۷۵	۰/۸۳	۰/۲۷	۰/۳۵	پایه

در مرحله بعدی به‌منظور افزایش سطح ویژه پودر آلومینیم ۲۰۲۴ زمینه بر اساس روش متالورژی پودر پولک و نزدیک شدن آن به نسبت ظاهری الیاف CNT در فرآوری نانوکامپوزیت AI2024-CNT، عملیات تهیه ساختار پولک شکل برای پودر آلومینیم ۲۰۲۴ با استفاده از فرآیند آسیاکاری با

بیش از یک دهه از علاقمندی محققین در سراسر جهان به استفاده از نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی با استفاده از مقاوم‌ساز نانوتیوب کربن می‌گذرد. همچنان این موضوع به‌عنوان یک موضوع روز مورد توجه بوده و سالانه حجم زیادی از مقالات و پایان‌نامه‌ها را در دانشگاه‌های مختلف و معتبر جهان به خود اختصاص می‌دهد. از هر دو منظر روش ساخت و مشخصه‌یابی، مطالعات جدید و گسترده‌ای در مورد نانوکامپوزیت‌های AI-CNT انجام می‌گیرد. از جمله مشکلات اصلی در ساخت پودر نانوکامپوزیت زمینه فلزی با مقاوم‌ساز CNT، دست‌یابی به توزیع یکنواخت و همگن نانوتیوب در زمینه بوده که به واسطه وجود نیروهای قوی واندروالس بین اتم‌های کربن و تمایل زیاد آن‌ها به تجمع و چسبیدن به یکدیگر، فرآیند پیچیده‌ای به شمار می‌آید. بدین منظور، روش‌های مختلفی برای تولید بهینه این نوع نانوکامپوزیت معرفی و استفاده شده است که هر یک دارای مزایا و معایبی می‌باشد. در این میان، سهم روش‌های بر پایه متالورژی پودر، به واسطه دمای کمتر فرآیند و امکان کنترل بهتر در مراحل ساخت، بیشتر از سایر روش‌ها بوده است [۱-۵].

بر اساس آخرین داده‌ها، همچنان روش‌های مکانیکی مانند آسیاکاری به‌عنوان روش ساخت غالب این نوع مواد معرفی شده و به کار برده می‌شوند و راهکارهایی برای کاهش تخریب‌های ناشی از برخورد گلوله‌ها با CNT پیشنهاد می‌شود. به‌عنوان مثال، در تحقیقات اخیر استفاده از محیط تر در حین آسیاکاری و یا به عبارتی پر کردن محفظه آسیاکاری از یک سیال محافظ یا خنثی مانند متانول پیشنهاد شده است که منجر به کاهش انرژی برخورد حین آسیاکاری و حفظ بهتر آن‌ها تا پایان فرآیند می‌شود [۶-۱۳].

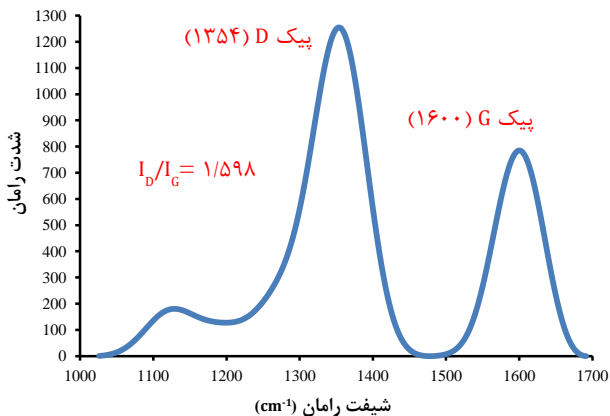
در مقابل این گروه، عده‌ای دیگر از پژوهشگران معتقدند که تفاوت اصلی نانوتیوب‌ها با نانوذرات در حفظ ساختار فیزیکی آن‌ها در طول فرآیند بوده و می‌بایست روش‌های آسیب‌زننده به ساختار نانوتیوب‌ها را کنار گذارده و از روش‌های سنتز شیمیایی و شیمی تر برای رسیدن به نانوکامپوزیت نهایی استفاده نمود.

از آن جمله می‌توان به روش‌هایی مانند متالورژی پودر پولک، سنتز شیمیایی بخار درجا، توزیع در مقیاس نانو و مخلوط‌سازی در ابعاد مولکولی اشاره نمود. این روش‌ها معمولاً دارای مراحل آماده‌سازی پیچیده‌ای بوده و نیازمند آگاهی و دانش لازم در حوزه علم شیمی و مواد است. علاوه بر اینها نوع فرآیند تفجوشی و رسیدن به قطعه نهایی از چالش‌های دیگر در فرآوری این دسته از مواد بوده و بدین منظور از روش‌های مشخصه‌یابی مختلف و متعددی برای اندازه‌گیری خواص نهایی استفاده می‌شود [۷-۱۸].

با توجه به چالش‌های فوق، در طی سال‌های گذشته تحقیقات بسیاری در راستای بهبود خواص مکانیکی فلزات سبک، از جمله آلومینیم با استفاده از نانوتیوب‌های کربن انجام گرفته است. گرچه اغلب این پژوهش‌ها مربوط به آلومینیم خالص به‌عنوان زمینه بوده است، اما در برخی از آن‌ها نیز از آلیاژهای آلومینیم مانند ۲۰۲۴، ۵۰۸۳، ۶۰۶۱، ۶۰۶۳ و ۷۰۷۵ استفاده شده است و مطالعات پیرامون مکانیزم‌های استحکام‌دهی در طی فرآیند متالورژی پودر و مطالعه فصل مشترک به‌منظور رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب و توزیع یکنواخت ترکیب پودر همچنان ادامه دارد.

از جمله کاربردهای این نوع کامپوزیت‌ها می‌توان به صنایع خودرو، هوافضا و هواپیمایی اشاره نمود. معمولاً برای قطعاتی که نیاز به چگالی کم و در مقابل سختی و استحکام بالا در برابر نیروهای خارجی و نیز حفظ هدایت حرارتی مناسب مدنظر باشد، از کامپوزیت‌های AI-CNT استفاده می‌شود.

به این منظور نمونه‌ها با فشار ۴۵۰ MPa به صورت سرد فشرده شدند و سپس در دمای ۵۵۰ °C تحت اتمسفر آرگون به مدت ۲ ساعت تحت عملیات تفجوشی قرار گرفتند.



شکل ۲ منحنی رامان CNT-COOH پس از عملیات رفلکس در اسید نیتریک

در ادامه نمونه‌ها در دمای ۴۰۰ °C تحت عملیات اکستروژن داغ تا رسیدن به مفتول نهایی با قطر ۱۰ mm قرار گرفتند. همچنین نمونه‌های آلیاژی و کامپوزیتی پس از انجام شکل دهی داغ، در دمای ۳۸۰ °C به مدت ۳ ساعت آنیل شدند تا تنش زدایی در آن‌ها به طور کامل صورت پذیرد. به منظور مقایسه بهتر در خواص مکانیکی و نیز مطالعه اثر عملیات حرارتی بر خواص نمونه آلیاژی و مقایسه آن با نمونه کامپوزیتی، یکی از نمونه‌های Al2024 تحت عملیات T6 به صورت محلول سازی در دمای ۴۹۰ °C به مدت ۱ ساعت، کوئنچ در حمام آب و در نهایت پیر سازی در دمای ۱۹۰ °C به مدت ۱۰ ساعت قرار گرفت. به این ترتیب نمونه‌های ساخته شده Al2024-O (آنیل شده)، Al2024-CNT و Al2024-T6 از نظر خواص مکانیکی و سطح شکست با یکدیگر مقایسه شده و نتایج مورد تحلیل قرار گرفته اند.

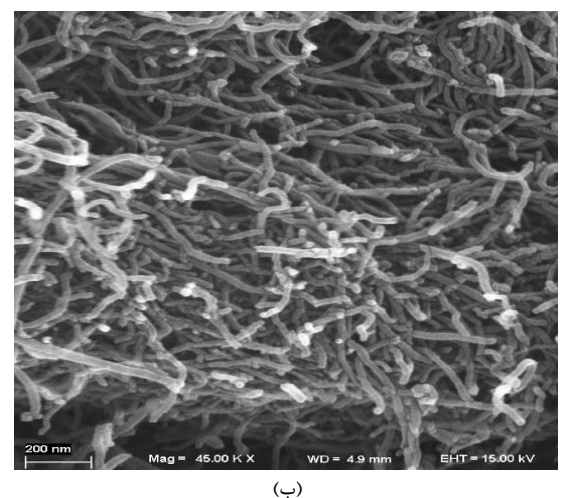
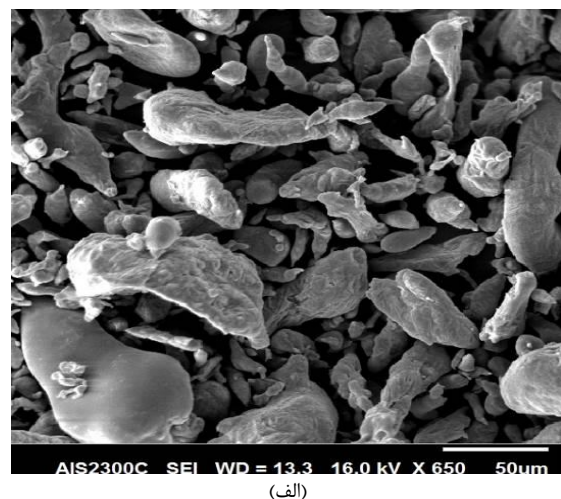
ریزساختار نهایی پودر کامپوزیت CNT 1.5 wt.% Al2024 و چگونگی توزیع نانوتیوب‌ها در زمینه و نیز آنالیز سطوح شکست، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی FE-SEM مورد مطالعه قرار گرفت. آنالیز فازی با استفاده از آزمایشات XRD، رامان و تصویر الکترون برگشتی صورت پذیرفت. خواص مکانیکی محصولات نیز با استفاده از آزمون های کشش، فشار و سختی مورد بررسی قرار گرفته و میزان چگالی نسبی و تخلخل نمونه‌ها با روش چگالی سنجی ارشمیدس اندازه‌گیری شده است.

۳- نتایج و تحلیل

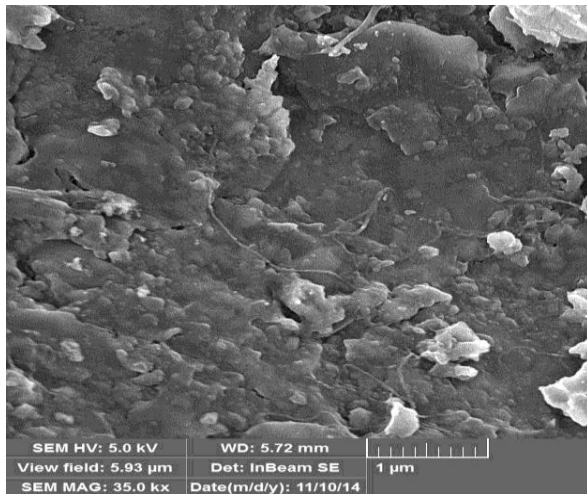
مطابق با شکل ۳ پس از آسیاکاری پودر Al2024 تا ۴ ساعت، مورفولوژی پودر به طور کامل به صورت پولکی شکل درآمده و نسبت قطر به ضخامت آن به عدد میانگین ۸۵ و ضخامت پودر پولک شکل به ۱/۵۳ μm رسیده است. با افزایش نسبت D/t و رسیدن به ضخامت کمتر برای پودر زمینه، نزدیکی بیشتری از لحاظ هندسی بین زمینه و مقاوم‌ساز اتفاق می افتد و توزیع مناسب تری از CNT در پودر Al2024 ایجاد می کند. در تغییر مورفولوژی پودر آلومینیم از حالت بی نظم به پولک شکل، از مکانیزمی تحت عنوان نورد میکرو به عنوان یک مکانیزم تغییر شکل نام برده می‌شود. به این صورت که، در واقع گلوله های فولادی مورد استفاده در عملیات آسیاکاری به مثابه غلنتک های نورد عمل کرده و پودر Al2024 در بین آن‌ها به صورت لحظه ای قرار می‌گیرد. به این ترتیب نورد پودر Al2024 در مقیاس میکرومتریک منجر به

آسیاب ماهواره ای در شرایط دور دستگاه ۲۵۰ rpm و BPR=۱۰ و در مدت زمان ۴ ساعت تحت اتمسفر آرگون انجام گرفت. از پودر اسید استتاریک به میزان ۱/۵ wt.% به عنوان عامل کنترل کننده فرآیند، برای جلوگیری از تجمع و به هم چسبیدگی پودر آلومینیم ۲۰۲۴ استفاده شده است.

پس از آماده سازی پودر آلومینیم ۲۰۲۴ زمینه از لحاظ مورفولوژی، می بایست پودر را از لحاظ شیمیایی نیز برای برقراری بهتر پیوندهای سطحی با نانوتیوب کربن اصلاح نمود. برای این منظور از پلیمر آبدوست پلی وینیل الکل (PVA) استفاده شد که پس از آماده کردن محلول ۳wt.% آن در آب مقطر، پودر ۲۰۲۴ به آن افزوده شد و به مدت ۲ ساعت با استفاده از همزن مغناطیسی همزده شد تا عامل هیدروکسیل بر سطح ذرات پودر ایجاد شود. در ادامه، سوسپانسیونی شامل ۵ گرم از پودر آلومینیم ۲۰۲۴ در ۱۰۰ ml آب مقطر تهیه شده و پس از تنظیم میزان PH=۳، محلول جوهری CNT-SA عامل دار شده با استفاده از بورت به صورت قطره قطره در دور بالا به آن اضافه شد و مخلوط حاصل تا رسیدن به حالت شفاف و ته نشین شدن پودر کامپوزیت توسط همزن مغناطیسی همزده شد. سپس با استفاده از تبخیرکننده چرخشی، آب موجود از سیستم حذف شد و پودر محصول تحت عملیات پیرولیز در دمای ۵۰۰ °C به مدت ۲ ساعت در اتمسفر Ar قرار گرفت تا عامل میانی PVA از آن به طور کامل حذف شود. به منظور فشرده سازی، از قالب استوانه ای با قطر ۳۰ mm برای ساخت قرص های اولیه استفاده شد.



شکل ۱ ریزساختار مواد اولیه: الف) Al2024 زمینه و ب) مقاوم‌ساز CNT



شکل ۴ تصویر FE-SEM از پودر Al2024-CNT سنتز شده به روش تر

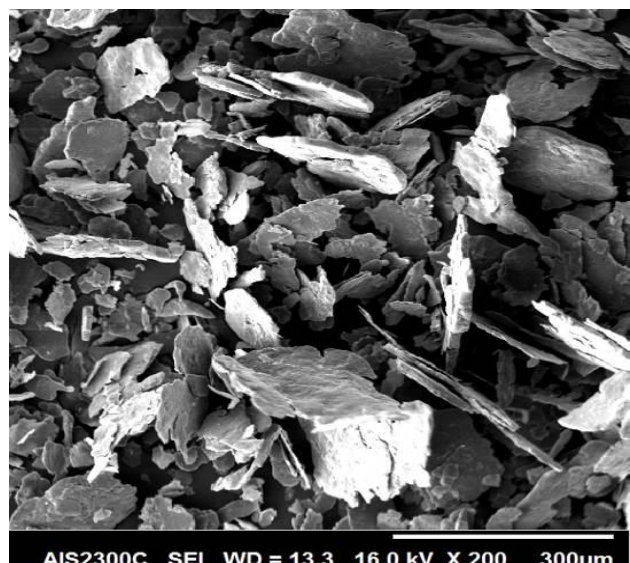
پس از اصلاح ساختاری و شیمیایی در سطوح خارجی مواد اولیه، عامل جذب و برقراری پیوند بین مقاوم‌ساز و زمینه، تشکیل پیوند هیدروژنی بین عامل سطحی کربوکسیل -COOH- نانوتیوب کربن و عامل هیدروکسیل -OH- بر سطح پودر Al2024 می‌باشد. به علاوه، وجود یون های SO_3^- و H^+ به ترتیب بر سطوح مقاوم‌ساز و زمینه، منجر به ایجاد قطبیت لحظه ای در محلول شده و مکانیزم توزیع مقاوم‌ساز در زمینه کامپوزیت را تسهیل می‌نماید. در این صورت پیش از خشک شدن نهایی پودر کامپوزیت، اجزای آن از طریق برقراری پیوند شیمیایی به یکدیگر متصل شده اند و با حذف محیط سیال نیز امکان تجمع مجدد و ایجاد آگلومره برای CNTs، از بین می‌رود. بدین ترتیب فرآیند تولید پودر نانو کامپوزیت Al2024-CNT بدون اعمال نیروی خارجی و انواع تخریب‌های ناشی از تنش‌های فیزیکی و صرفاً از طریق واکنش‌های شیمیایی بین اجزاء کامپوزیت انجام گرفته است.

به منظور بررسی اثر تفجوشی و نیز استفاده از عملیات حرارتی برای نمونه‌های Al2024-O، Al2024-T6 و Al2024-CNT از آزمایشات چگالی و سختی استفاده شده است که نتایج مربوط به آن در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به جدول می‌توان گفت که با انجام تفجوشی و اکستروژن داغ نمونه‌ها، سختی برای Al2024-O تا میزان ۷۲ HB و برای Al2024-T6 تا ۸۶ HB رسیده است. علاوه بر این، نقش فازهای میانی بین فلزی و رسوبات غنی از مس با توزیع یکنواخت در زمینه که پس از انجام عملیات حرارتی T6 تشکیل می‌شوند را نیز می‌بایست در افزایش سختی نمونه Al2024-T6 در نظر گرفت. برای نمونه Al2024-CNT پس از انجام تفجوشی در دمای $550^\circ C$ و سپس آنیل نهایی، سختی تا میزان ۹۰ HB افزایش یافته است. این مطلب می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی علاوه بر تفجوشی حالت جامد باشد که از آن جمله می‌توان به نقش عملیات آسیاکاری به مدت زمان ۴ ساعت تا رسیدن به مورفولوژی پولک شکل برای پودر زمینه Al2024 و نیز تشکیل فازهای احتمالی در زمان تفجوشی بین زمینه و مقاوم‌ساز مانند کاربرد Al_4C_3 اشاره نمود. در مورد میزان تغییرات چگالی نسبی، برای نمونه‌های آلیاژی چگالی نسبی تا میزان ۹۶ درصد افزایش یافته و این عدد برای نمونه نانو کامپوزیت ۹۵/۶ درصد اندازه‌گیری شده است. برای رسیدن به چگالی نسبی بالاتر و به تبع آن استحکام نهایی بیشتر در زمینه Al2024 در حالت آلیاژی و کامپوزیت، می‌توان فشرده‌سازی تک محوره را در محدوده فشار بالاتر (تا ۹۵۰ MPa) و یا اکستروژن داغ را با نسبت اکستروژن بالا (مانند

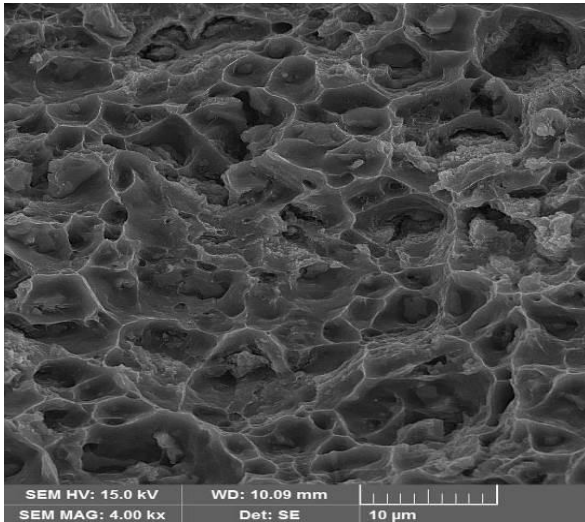
تغییر شکل آن و رسیدن به حالت پولک شکل نهایی می‌شود. پارامتر هندسی قطر به ضخامت پولک به صورت D/t ، نقش مهمی در انجام بهینه این فرآیند و در ادامه ساخت پودر نانو کامپوزیت به روش تر دارد.

تصویر ریزساختار نهایی پودر کامپوزیت Al2024-CNT در شکل ۴ آورده شده است. در این ریزساختار، دو ویژگی مهم روش تر یعنی حفظ ساختار نانوتیوب در کل فرآیند و نیز توزیع همگن آن‌ها در زمینه ملاحظه می‌شود. در نتیجه می‌توان خواص مطلوبی از نظر خواص مکانیکی در مقایسه با پودر Al2024 مقاوم نشده از آن انتظار داشت. نکته بسیار مهم در این شکل علاوه بر توزیع همگن CNT در زمینه، حفظ طول موثر الیاف نانوتیوب پس از انجام مراحل روش تر است. در حالی که در بسیاری از مقالات که از روش نیمه تر یا آسیاکاری خشک برای سنتز نانو کامپوزیت Al2024-CNT استفاده شده است، با وجود نیاز به زمان طولانی تر در عملیات آسیاکاری نسبت به آلومینیم خالص، میزان تخریب بسیار زیاد بوده و عملاً طول موثر CNT در توزیع نهایی بسیار کاهش می‌یابد، علاوه بر اینکه تخریب‌های دیگری نیز ممکن است در ساختار داخلی زنجیره های کربن ایجاد شود.

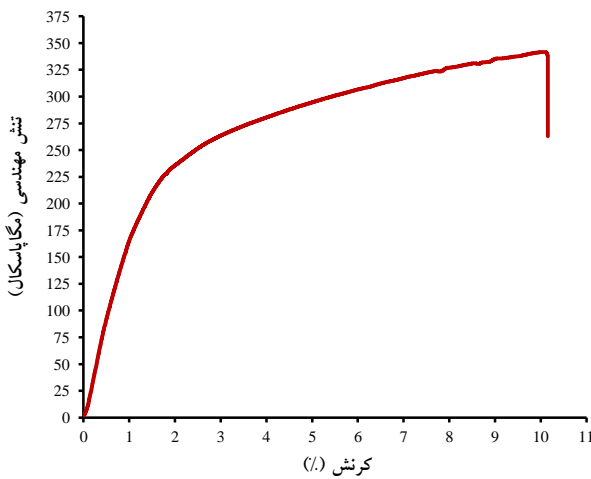
در تحلیل مکانیزم توزیع نانوتیوب کربن بین پودر Al2024 زمینه در محیط آبی، می‌بایست نقش مهمی را که عوامل سطحی و شیمیایی ایفا می‌کنند، در نظر گرفت. برای سوسپانسیون پودر Al2024 در محیط آبی، علاوه بر پوشش PVA، عامل PH نیز نقش مهمی در پایدارسازی آن ایفا می‌کند. پس از افزودن چند قطره اسید نیتریک رقیق شده و رسیدن به $PH=3$ ، اسید نیتریک در محیط آب هیدرولیز شده و به صورت یون های H^+ و NO_3^- در می‌آید. در طرف مقابل، محلول توزیع شده CNT در آب در ابتدا به رنگ جوهری می‌باشد که عوامل کربوکسیل -COOH- و نیز بار منفی SO_3^- ناشی از سورفکتانت آنیونی بر سطح نانوتیوب‌ها قرار دارند. پس از اضافه کردن محلول CNT به سوسپانسیون پودر Al2024 و همزدن آن با دور بالا، به تدریج رنگ محلول به صورت شفاف در آمده و پس از خاموش کردن همزن، پودر کامپوزیت به صورت یکپارچه و همزمان در انتهای بشر رسوب می‌نماید. در این حالت مخلوط نهایی در محیط آبی به حالت پایدار رسیده و شاخص PH به میزان $PH=5$ می‌رسد [۱۵-۱۸].



شکل ۳ ریزساختار پولک شکل Al2024 زمینه پس از آسیاکاری



شکل ۶ تصویر FE-SEM سطح شکست نمونه Al2024-O



شکل ۷ منحنی تنش-کرنش نمونه Al2024-T6 تفجوشی شده در دمای ۵۵۰°C

این مطلب در آنالیز سطح شکست نیز در شکل ۸ قابل مشاهده است که در برخی از مناطق شکست از نوع ترد با سطح صاف ایجاد شده، اما در اکثر مناطق دیگر در زمینه، شکست نرم با تغییر شکل کامل دانه ها وجود دارد. شکل کروی حفرات در سطح شکست، نشان دهنده انجام مراحل تفجوشی به طور کامل بوده و حفرات سه گوش به ندرت در مرز دانه ها وجود دارد.

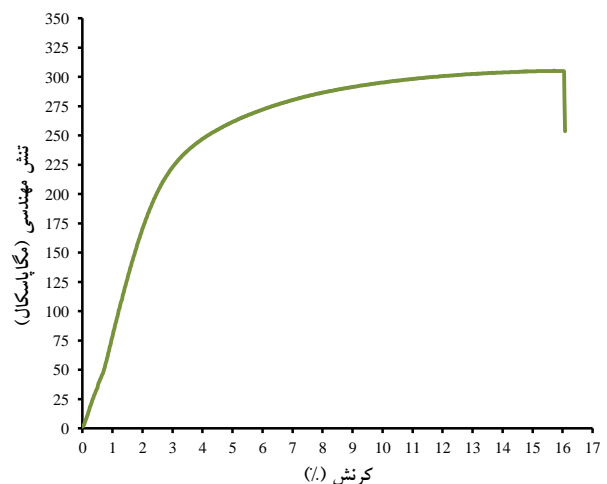
در شکل ۹ منحنی تنش-کرنش برای نمونه Al2024-CNT تفجوشی شده در دمای ۵۵۰ °C ملاحظه می‌شود و همچنین سطح شکست مربوط به آن در شکل ۱۰ آورده شده است. برای این نمونه تنش تسلیم ۲۳۲ MPa، استحکام نهایی ۳۹۱ MPa و میزان کرنش تا شکست ۸/۵ درصد به دست آمده است. به این ترتیب با افزودن ۱/۵wt.% نانوتیوب کربن، استحکام تسلیم و نهایی به میزان ۲۸ درصد در مقایسه با نمونه Al2024-O و به مقدار ۲۰ درصد استحکام تسلیم و ۱۵ درصد استحکام نهایی نسبت به نمونه Al2024-T6 افزایش یافته است. این در حالی است که برای نمونه نانوکامپوزیت Al2024-CNT تنها عملیات آنیل نهایی به منظور کاهش تنش های باقیمانده ناشی از اکستروژن داغ انجام شده و هیچ گونه عملیات رسوب سختی در مورد آن اعمال نشده است.

Al2024-O اعمال نمود. در شکل ۵ منحنی تنش-کرنش برای نمونه Al2024-O تفجوشی شده در دمای ۵۵۰ °C آورده شده است و همچنین سطح شکست مربوط به آن در شکل ۵ مشاهده می‌شود. برای این نمونه تنش تسلیم ۱۸۱ MPa، استحکام نهایی ۳۰۵ MPa و میزان کرنش تا شکست ۱۶/۳ درصد حاصل شده است. این بدان معنا است که با اعمال پرس سرد-تفجوشی و اکستروژن داغ و نیز استفاده از عملیات آنیل در دمای ۳۸۰ °C به مدت ۳ ساعت برای محصولات اکستروژن شده، منجر به اتصال مناسب بین دانه های پودر زمینه و نیز حذف تنش های باقیمانده در اثر شکل دهی شده و ضمن حفظ داکتیلیته، استحکام قابل توجهی در نمونه ایجاد شده است. البته به این نکته می بایست توجه نمود که با انجام اکستروژن داغ در دمای ۴۰۰ °C، افزایش کارسختی حین اکستروژن و در نتیجه افزایش استحکام تا مقادیر بالاتر ایجاد می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۶ و آنالیز سطح شکست، مشاهده می‌شود که در بسیاری از مناطق حفرات کروی تشکیل شده اند و تغییر شکل پلاستیک به صورت نرم در دانه ها رخ داده است.

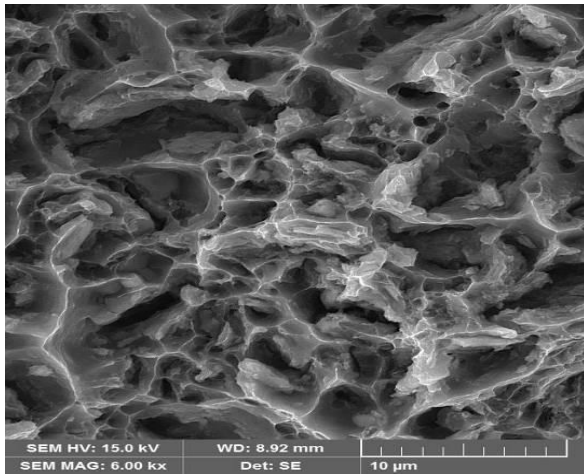
در شکل ۷ منحنی تنش-کرنش برای نمونه Al2024-T6 تفجوشی شده در دمای ۵۵۰ °C ملاحظه می‌شود و همچنین سطح شکست مربوط به آن در شکل ۸ نشان داده شده است. برای این نمونه تنش تسلیم ۱۹۳ MPa، استحکام نهایی ۳۴۱ MPa و میزان کرنش تا شکست ۱۰/۲ درصد به دست آمده است. این نتایج مشخص می‌سازد که برای این نمونه علاوه بر نقش عملیات کارسختی حین اکستروژن داغ، انجام عملیات حرارتی رسوب سختی T6 و تشکیل فازهای میانی بین فلزی نیز نقش مهمی در افزایش استحکام ایفا می کند. از آنجا که این رسوبات بین فلزی نسبت به زمینه آلومینیم معمولاً ترد می باشند، تا حدودی منجر به کاهش داکتیلیته و درصد تغییر طول نمونه می گردند، اما اثر آن‌ها در افزایش استحکام بسیار شاخص است.

جدول ۳ نتایج چگالی و سختی نمونه‌های Al2024-T6، Al2024-O و

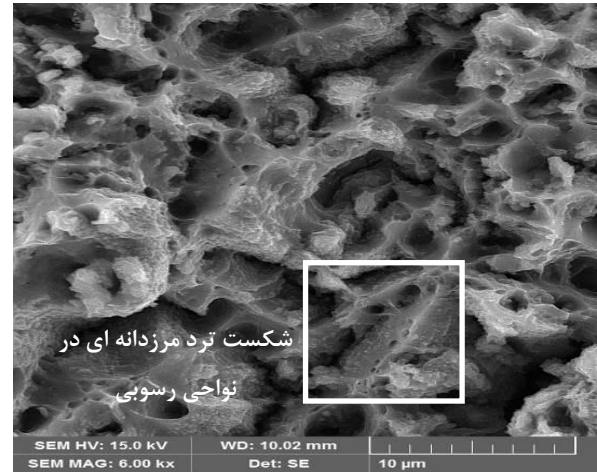
ماده/ویژگی	وزن خشک (g)	وزن اشباع (g)	وزن غوطه وری (g)	ρ_b (g/cm ³)	$\rho_b/\rho_t \times 100$ (HB)	سختی
Al2024-O	۱/۴۹	۱/۵۳	۰/۹۷	۲/۶۶	۹۶/۵۴	۷۲/۵
Al2024-T6	۱/۳۵	۱/۳۷	۰/۸۶	۲/۶۵	۹۶/۱۸	۸۶/۴
Al2024-1.5CNT	۱/۲۴	۱/۲۶	۰/۷۹	۲/۶۳	۹۵/۶۳	۹۰/۱



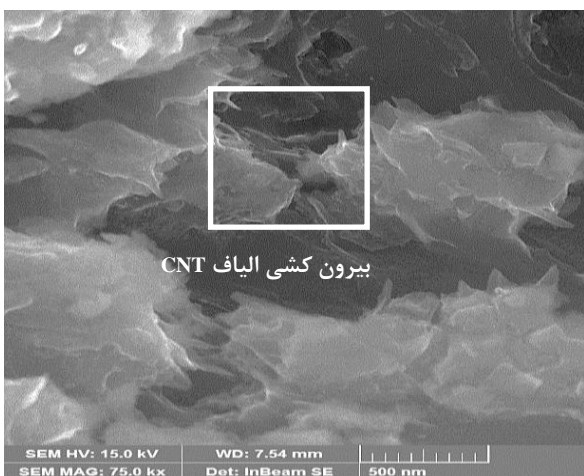
شکل ۵ منحنی تنش-کرنش نمونه Al2024-O تفجوشی شده در دمای ۵۵۰°C



(الف)

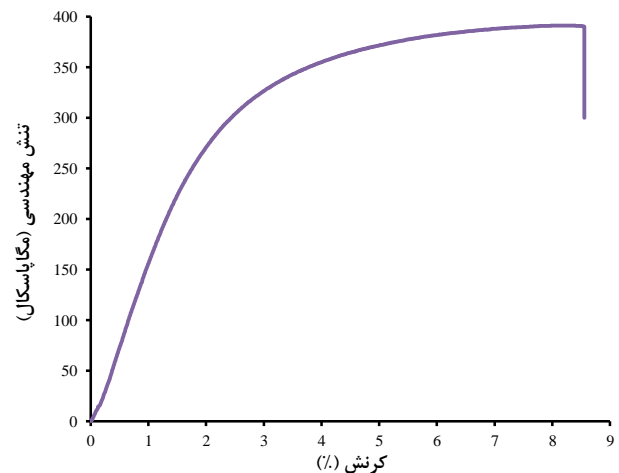


شکل ۸ تصویر FE-SEM سطح شکست نمونه Al2024-T6



(ب)

شکل ۱۰ تصاویر FE-SEM از سطح شکست نانو کامپوزیت Al2024-1.5wt.%CNT، تفجوشی شده در دمای ۵۵۰°C در دو بزرگ‌نمایی



شکل ۹ منحنی تنش-کرنش نمونه Al2024-CNT تفجوشی شده در دمای ۵۵۰°C

جدول ۴ خلاصه نتایج خواص مکانیکی نمونه‌های Al2024-0

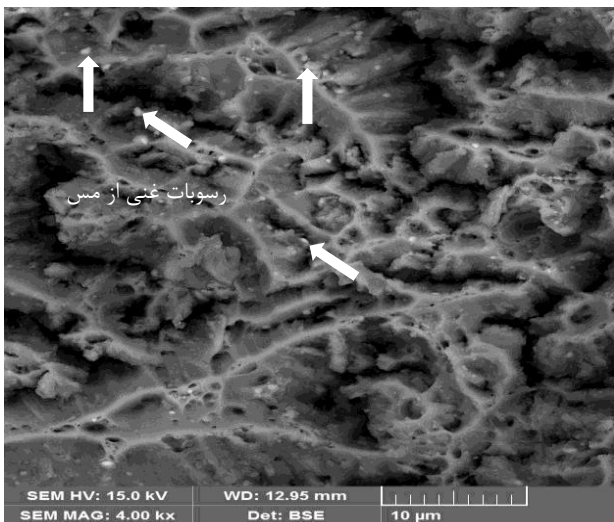
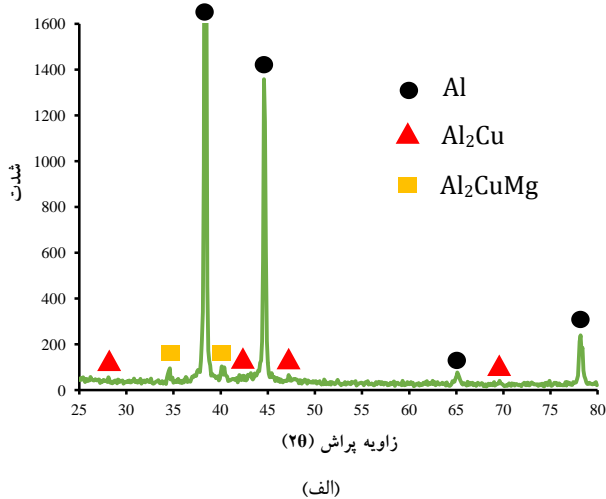
Al2024-CNT و Al2024-T6

استحکام فشاری (MPa)	کرنش شکست (%)	σ_{UTS} (MPa)	σ_y (MPa)	ماده / ویژگی
۴۲۱	۱۶/۳	۳۰۵	۱۸۱	Al2024-0
-	۱۰/۲	۳۴۱	۱۹۳	Al2024-T6
۵۴۷	۸/۵	۳۹۱	۲۳۲	Al2024-1.5CNT

در شکل ۱۲-الف منحنی XRD برای نمونه Al2024-T6 ملاحظه می‌شود که بر اساس آن، پیک‌های اصلی پس از انجام عملیات حرارتی T6 شامل Al₂Cu و Al₂CuMg می‌باشد. در شکل ۱۲-ب از تصویر الکترون برگشتی میکروسکوپ الکترونی FE-SEM برای آنالیز فازی سطح شکست نمونه Al2024-T6 استفاده شده است. در این تصویر، کنتراست رنگ بین ترکیبات غنی از مس و آلومینیم زمینه، ناشی از اختلاف در جرم اتمی آن‌ها بوده، به گونه‌ای که مناطق غنی از ترکیبات مس به صورت روشن‌تر از زمینه مشاهده می‌شوند (فلش‌های سفیدرنگ). با توجه به شکل، رسوبات سفید رنگ غنی از مس به صورت یکنواخت در همه مناطق زمینه و نیز در مناطق پر انرژی مانند

با توجه به تصاویر آنالیز شکست برای نمونه کامپوزیتی می‌توان گفت، تغییر شکل پلاستیک برای دانه‌های زمینه به میزان زیادی انجام شده است و شکست نرم در بسیاری از نقاط قابل تشخیص است. با در نظرگیری تصویر با بزرگنمایی بالاتر می‌توان ملاحظه نمود که پدیده‌های بیرون کشی نانوتیوب از داخل زمینه و در مواردی پل زدن نانوتیوب‌ها در بین ترک‌های ایجاد شده در اثر تنش، ایجاد شده است. از دیگر آزمون‌های مکانیکی مورد استفاده برای بررسی اثر نانوتیوب کربن در زمینه آلومینیم ۲۰۲۴، آزمون فشار بوده است که منحنی‌های استحکام فشاری بر حسب کرنش برای نمونه Al2024-0 و Al2024-CNT در شکل ۱۱ نشان داده شده است. به عنوان مثال، همانگونه که ملاحظه می‌شود در کرنش فشاری ۴۵ درصد، استحکام فشاری اندازه‌گیری شده برای نمونه Al2024-0 برابر با ۴۲۱ MPa و برای نمونه کامپوزیت Al2024-CNT برابر با ۵۴۷ MPa اندازه‌گیری شده است. به این ترتیب نمونه کامپوزیتی دارای شکل پذیری در آزمایش فشار بوده و استحکام آن تا میزان ۱۲۶ MPa افزایش یافته است. خلاصه‌ای از نتایج خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده در جدول ۴ ملاحظه می‌شود. در ادامه به منظور بررسی دقیق‌تر فصل مشترک مقاوم‌ساز و زمینه، فازهای تشکیل شده در حین عملیات حرارتی تفجوشی و T6 نهایی و نقش آن در استحکام دهی زمینه، آنالیز فازی هر یک از نمونه‌ها انجام گرفته و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. بدین منظور می‌توان از آزمایشات XRD، رامان و نیز تصاویر الکترون برگشتی مربوط به میکروسکوپ FE-SEM استفاده نمود.

۱ μm قابلیت تشکیل دارند و ساختار اولیه آنها در برخی صفحات مانند (۰۰۱) با زمینه یکسان است. به این ترتیب در ابتدا به صورت شبه کوهیرنت در نظر گرفته می‌شوند و در استحکام دهی نقش دارند. به تدریج با رشد فاز θ' در زمینه، از میزان کوهیرنسی آن کاسته می‌شود و پس از رسیدن به پیک منحنی سختی- زمان پیرسازی، منجر به فرآپیری نمونه شده و سختی (استحکام) آن کاهش می‌یابد. در نتیجه، مقدار حداکثر سختی با وجود ترکیب همزمان فازهای θ'' و θ' ایجاد می‌گردد [۲۰].

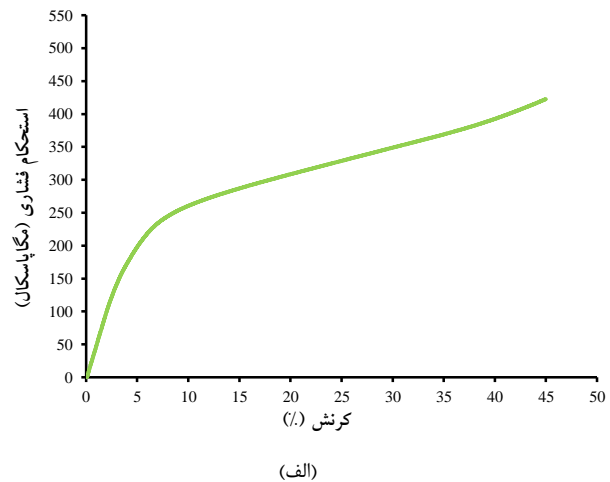


(ب)

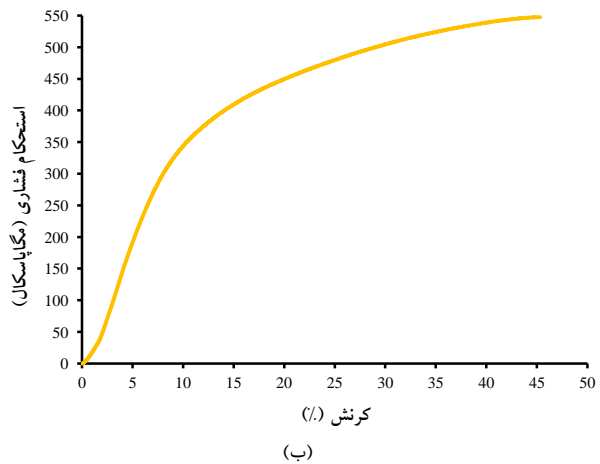
شکل ۱۲ آنالیز فازی نمونه Al2024-T6: الف) منحنی XRD و ب) تصویر الکترون برگشتی نشان دهنده رسوبات غنی از مس

در شکل ۱۳-الف منحنی XRD برای نمونه کامپوزیت Al2024-1.5wt.%CNT آورده شده است. با توجه به این منحنی می‌توان بیان نمود که پس از تفجوشی نمونه کامپوزیتی در دمای ۵۵۰ °C، فازهای موجود شامل Al، فازهای بین فلزی Al2Cu و Al2CuMg و نیز فاز میانی ناشی از واکنش بین زمینه و مقاوم ساز به صورت کاربید Al4C3 می‌باشد. زاویه پراش ۲θ برای هر یک از فازهای فوق شامل Al در ۳۷، ۴۵، ۶۵ و ۷۸ درجه، فاز بین فلزی Al2Cu در ۴۳، ۴۷ و ۶۹ درجه، فاز Al2CuMg در ۳۵ و ۴۰ درجه و پیک مربوط به کاربید Al4C3 در ۵۵ و ۷۳ درجه تشکیل شده است.

مرزخانه ها توزیع شده اند. این رسوبات نقش عمده‌ای در افزایش استحکام زمینه در نمونه Al2024-T6 ایفا نموده و با توجه به شکل ۱۲-ب، پس از انجام فرآیند پیرسازی به مدت ۱۰ ساعت، تا مقدار تقریبی ۳۰۰ nm رشد می‌نمایند.



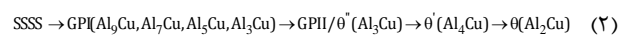
(الف)



(ب)

شکل ۱۱ منحنی استحکام فشاری بر حسب کرنش مربوط به نمونه های: Al2024-0 و Al2024-CNT (ب) و Al2024-0 (الف)

در این حالت، تشکیل هر یک از رسوبات فوق از حالت محلول جامد فوق اشباع اولیه تا رسیدن به رسوب نهایی به صورت ذیل تعریف می‌شود [۱۹]:



در روابط (۱) و (۲) عبارت SSSS مربوط به محلول جامد فوق اشباع و عبارت GPB مربوط به مناطق رسوبی است که اولین بار توسط Silcock پیشنهاد شده و متفاوت از نواحی GP در آلیاژهای متداول Al-Cu می‌باشد. اختلاف در برخی از مناطق رسوبی و فازهای تشکیل شده، ناشی از تفاوت اندازه، شکل، ترکیب شیمیایی و میزان نظم اتمی، جهت گیری و ساختار کریستالی نسبت به زمینه می‌باشد [۱۹].

در بحث استحکام دهی دو عامل اندازه رسوبات و میزان کوهیرنسی آنها با زمینه مطرح است. رسوبات اولیه شامل GP Zone و فاز θ'' دارای اندازه در مقیاس نانومتریک و به شکل کاملاً کوهیرنت با زمینه بوده و منجر به افزایش استحکام می‌شوند. در مقابل، رسوبات θ' در محدوده قطری بین ۱۰ nm تا

برای نمونه Al2024-O رسوبات Al₂Cu و Al₂CuMg طی عملیات تفجوشی و سپس آنیل نهایی نمونه‌ها تشکیل می‌شوند. این رسوبات بین فلزی درشت بوده و جوانه زنی آنها در مرحله تفجوشی و رشد آنها در حین سرد شدن آهسته تا دمای محیط صورت می‌گیرد. در این حالت، نفوذ اتم‌های مس و منیزیم از طریق مرزدانه به عنوان مکانیزم غالب مطرح بوده و پس از کاهش حد حلالیت عناصر آلیاژی در زمینه، در نهایت به رسوبات S و θ می‌رسد. سرعت جوانه زنی و رشد رسوبات با کاهش اندازه دانه احتمالی زمینه در اثر عملیات آسیاکاری برای ایجاد ساختار پولک بیشتر می‌شود، زیرا مکان‌های پراثرتری بیشتری برای تشکیل آنها مانند مرزدانه‌ها یا ذرات کارسخت شده وجود دارد [۱۹]. در نمونه Al2024-CNT نقش همزمان دو عامل لیاف نانوتیوب کربن و رسوبات تشکیل شده در زمینه پس از تفجوشی وجود دارد. در این حالت نانوتیوب‌ها همانند مرزدانه‌ها، به عنوان یک مسیر نفوذپذیری سریع برای نفوذ اتم‌های مس در زمینه عمل می‌نمایند. به این ترتیب با وجود تنش بالا، چگالی نایجایی در دو انتهای CNT زیاد بوده و به عنوان یک مکان مناسب جهت جوانه زنی و رشد رسوبات شناخته می‌شوند. همچنین با توجه به واکنش تشکیل فاز میانی کاربرد بین زمینه و مقاوم ساز در فصل مشترک و گرمازا بودن آن، پیش بینی می‌شود مورفولوژی، جهت گیری و اندازه رسوبات در اطراف فاز مقاوم ساز با دیگر نقاط زمینه متفاوت باشد.

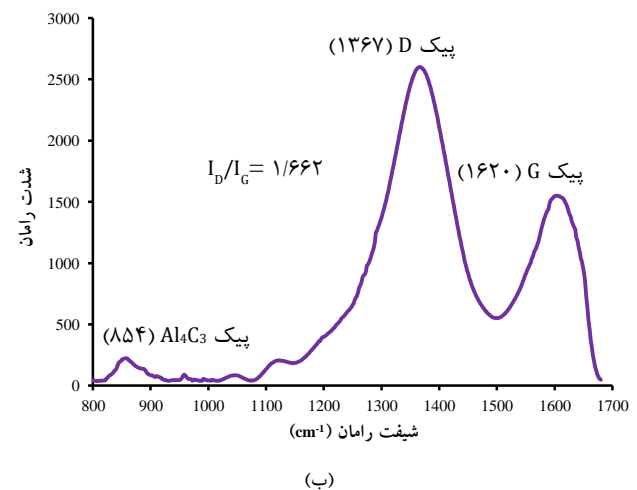
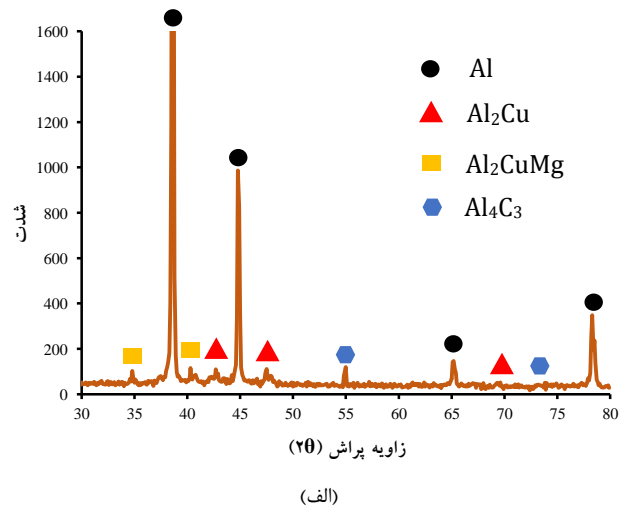
در مورد نمونه Al2024-CNT فاز میانی تشکیل شده کاربردی (Al₄C₃) بر اساس آزمایشات XRD و رامان گزارش شده است که با ایجاد لایه نازکی از آن، استحکام برشی در فصل مشترک بیشتر می‌گردد. اثر لایه کاربرد در فصل مشترک در تسهیل مکانیزم انتقال بار از زمینه به CNT مشخص می‌گردد که باعث قفل شدن نانوتیوب‌ها در زمینه می‌شود. این مطلب در دو انتهای نانوتیوب‌ها با توجه به اینکه صفحات منشوری آنها تحت واکنش با فلز زمینه قرار می‌گیرد، محتمل تر به نظر می‌رسد.

۴- نتیجه گیری

نتایج ذیل از این پژوهش قابل حصول می‌باشند:

- عامل جذب و برقراری پیوند بین مقاوم ساز و زمینه در روش تر، تشکیل پیوند هیدروژنی بین عامل کربوکسیل -COOH- نانوتیوب کربن و عامل هیدروکسیل -OH- پودر Al2024 می‌باشد. همچنین وجود یون های SO₃⁻ و H⁺ به ترتیب بر سطوح مقاوم ساز و زمینه، منجر به قطبیت لحظه‌ای در محلول شده و مکانیزم توزیع مقاوم ساز در زمینه را تسهیل می‌نماید.
- بر اساس نتایج آزمایش‌های مکانیکی، استحکام تسلیم برای نمونه‌های Al2024-O، Al2024-T6 و Al2024-1.5wt.%CNT به ترتیب برابر با ۱۸۱، ۱۹۳ و ۲۳۲ MPa و استحکام نهایی برای آنها به ترتیب اعداد ۳۰۵، ۳۴۱ و ۳۹۱ MPa حاصل شده است. میزان کرنش شکست برای نمونه‌های مذکور به میزان ۱۶/۳، ۱۰/۲ و ۸/۵ درصد به دست آمده که کاهش داکتیلیته با توجه به تشکیل فازهای میانی و انجام واکنش بین فاز مقاوم ساز و زمینه قابل توجیه است.
- میزان سختی برای نمونه‌های Al2024-O، Al2024-T6 و Al2024-CNT به ترتیب برابر با ۸۶، ۷۲ و ۹۰ HB اندازه گیری شد و استحکام فشاری در کرنش ۴۵ درصد برای Al2024-O و Al2024-CNT، حاکی از افزایش از میزان ۴۲۱ به ۵۴۷ MPa با افزودن ۱/۵ درصد وزنی نانوتیوب کربن است.
- آنالیز فازی با آزمایش XRD برای نمونه‌های آلیاژی و کامپوزیتی، وجود فازهایی شامل Al، ترکیبات بین فلزی Al₂Cu و Al₂CuMg را برای

به این ترتیب افزایش استحکام برای زمینه Al2024 پس از افزودن نانوتیوب کربن، از طریق فازهای میانی تشکیل شده در حین تفجوشی صورت می‌پذیرد که نقش هر یک از آنها در فصل آتی مورد بررسی جامع‌تری قرار می‌گیرد. از آزمایش رامان نیز می‌توان برای بررسی امکان تشکیل Al₄C₃ در حین تفجوشی در نمونه کامپوزیتی استفاده نمود. منحنی مربوط به آزمایش رامان برای نمونه Al2024-CNT در شکل ۱۳-ب ملاحظه می‌گردد. بر اساس این منحنی پیک مربوط به تشکیل کاربرد در عدد شیفت رامان ۸۵۴ cm⁻¹ تشکیل شده است. نقش کاربرد در انتقال بار اعمالی از زمینه به مقاوم ساز و نیز افزایش سختی در نمونه کامپوزیتی در مقایسه با نمونه فاقد نانوتیوب کربن بسیار حائز اهمیت می‌باشد. نسبت I_D/I_G در نمونه مذکور پس از انجام مراحل ساخت پودر کامپوزیت، فشرده سازی، تفجوشی و اکستروژن داغ نهایی، به عنوان یک شاخص مهم در بررسی میزان تخریب نانوتیوب‌ها در طول فرآیند قابل بررسی است. بر اساس شکل، این نسبت برابر با ۱/۶۶۲ برای نمونه Al2024-CNT به دست آمده است که با مقایسه آن با عدد مربوط به نانوتیوب کربن اولیه پس از عملیات اسید شویی در شکل ۲ (I_D/I_G=۱/۵۹۸) به میزان تنها ۴ درصد افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تخریب در طول انجام مراحل فوق حداقل بوده و حفظ کردن نانوتیوب‌ها در هر مرحله تا رسیدن به محصول نهایی به طور مناسبی صورت پذیرفته است.



شکل ۱۳ نتایج آنالیز نمونه Al2024-CNT: الف) منحنی XRD و ب) منحنی رامان

- [17] Rikhtegar, F. Shabestari, S. and Saghafian, H., "Investigation on the dispersion mechanism of carbon nanotubes in Al matrix during processing of Al-CNT nanocomposite using slurry based method" In Persian, Journal of Iranian Metallurgical Engineering Society Vol. 56, pp. 3-10, 2015.
- [18] Rikhtegar, F. Shabestari, S. and Saghafian, H., "The Homogenizing of Carbon Nanotube Dispersion in Aluminium Matrix Nanocomposite Using Flake Powder Metallurgy and Ball Milling Methods," Powder Technology, Vol. 280, pp. 26-34, 2015.
- [19] Wang, S. and Starink, M., "Precipitates and Intermetallic Phases in Precipitation Hardening Al-Cu-Mg-(Li) Based Alloys," International Materials Reviews, Vol. 50, pp. 1-23, 2005.
- [20] Brooks, C. "Heat treatment, structure and properties of nonferrous alloys," Forth ed., ASM International, Metals Park Ohio, pp. 140-285, 1990.

نمونه‌های آلیاژی بدون نانوتیوب کربن مشخص می‌سازد و برای نمونه کامپوزیتی علاوه بر موارد فوق، وجود فاز میانی کاربید Al_4C_3 از طریق آزمایشات XRD و رامان اثبات گردید.

• نسبت I_D/I_G برابر با ۱/۶۶۲ برای نمونه Al2024-CNT به دست آمده که با مقایسه آن با عدد مربوط به CNT اولیه ($I_D/I_G=1/598$) به میزان تنها ۴ درصد افزایش یافته است. در نتیجه حداقل تخریب در حین انجام مراحل ساخت کامپوزیت وجود داشته است.

۵- تقدیر و تشکر

از حمایت‌های قطب علمی فناوری آلیاژهای با استحکام بالا در دانشگاه علم و صنعت ایران و صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور در اجرای این پروژه تحقیقاتی تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶- مراجع

مراجع

- [1] Liao, J. and Tan, M., "Mixing of Carbon Nanotubes (CNTs) and Aluminum Powder for Powder Metallurgy Use," Powder Technology, Vol. 208, pp. 42-48, 2011.
- [2] Liao, J. and Tan, M., "A Simple Approach to Prepare Al/CNT Composite: Spread-Dispersion (SD) Method," Materials Letters, Vol. 65, pp. 2742-2744, 2011.
- [3] Yoo, S. Han, S. and Kim, W., "Strength and Strain Hardening of Aluminum Matrix Composites with Randomly Dispersed Nanometer-Length Fragmented Carbon Nanotubes," Scripta Materialia, Vol. 68, pp. 711-714, 2013.
- [4] Pérez-Bustamante, R. Pérez-Bustamante, F. Estrada-Guel, I. and Santillán-Rodríguez, C., "Characterization of Al2024-CNTs Composites Produced by Mechanical Alloying," Powder Technology, Vol. 212, pp. 390-396, 2011.
- [5] Simoes, S. Viana, F. Reis, M. and Vieira, M., "Influence of Dispersion/Mixture Time on Mechanical Properties of Al-CNTs Nanocomposites," Composite Structures, Vol. 126, pp. 114-122, 2015.
- [6] Chunfeng, D. Xuexi, Z. and Dezun, W., "Chemical Stability of Carbon Nanotubes in the Al2024 Matrix," Materials Letters, Vol. 61, pp. 904-907, 2007.
- [7] Poirier, D. Gauvin, R. and Drew, R., "Structural Characterization of A Mechanically Milled Carbon Nanotube/Aluminum Mixture," Composites: Part A, Vol. 40, pp. 1482-1489, 2009.
- [8] Esawi, A. Morsi, K. Sayed, A. and Gawad, A., "Fabrication and Properties of Dispersed Carbon Nanotube-Aluminum Composites," Materials Science and Engineering A, Vol. 508, pp. 167-173, 2009.
- [9] Kwon, H. Park, D. Silvain, J. and Kawasaki, A., "Investigation of Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composite Materials," Composites Science and Technology, Vol. 70, pp. 546-550, 2010.
- [10] Simoes, S. Viana, F. Reis, M. and Vieira, M., "Improved Dispersion of Carbon Nanotubes in Aluminum Nanocomposites," Composites Structures, Vol. 108, pp. 992-1000, 2015.
- [11] Bustamante, R. Pérez-Bustamante, F. Guel, I. and Jiménez, L., "Effect of Milling Time and CNT Concentration on Hardness of CNT/Al2024 Composites Produced by Mechanical Alloying," Materials Characterization, Vol. 75, pp. 13-19, 2013.
- [12] Choi, H. Min, B. Shin, J. and Bae, D., "Strengthening in Nanostructured 2024 Aluminum Alloy and Its Composites Containing Carbon Nanotubes," Composites: Part A, Vol. 42, pp. 1438-1444, 2011.
- [13] Pérez-Bustamante, R. González-Ibarra, M. González-Cantú, J. and Estrada-Guel, I., "AA2024-CNTs Composites by Milling Process after T6-Temper Condition," Journal of Alloys and Compounds, Vol. 536, pp. 17-20, 2012.
- [14] Tang, J. Fan, G. Li, Z. and Li, X., "Synthesis of Carbon Nanotube/Aluminium Composite Powders by Polymer Pyrolysis Chemical Vapor Deposition," Carbon, Vol. 55, pp. 202-208, 2012.
- [15] Jiang, L. Li, Z. Fan, G. and Cao, L., "The Use of Flake Powder Metallurgy to Produce Carbon Nanotube (CNT)/Aluminum Composites with A Homogenous CNT Distribution," Carbon, Vol. 50, pp. 1993-1998, 2012.
- [16] Jiang, L. Fan, G. Li, Z. and Kai, X., "An Approach to the Uniform Dispersion of A High Volume Fraction of Carbon Nanotubes in Aluminum Powder," Carbon, Vol. 49, pp. 1965-1971, 2011.

