

ساخت و بررسی خواص مکانیکی و خوردگی کامپوزیت آلومینیم A356- نانولوله‌های کربنی

سید رحیم کیا حسینی* و علی عابدی

دانشکده فنی و مهندسی، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۶/۰۵/۲۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۶/۰۸/۲۶، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۶/۱۰/۰۵

چکیده

در این تحقیق، این کامپوزیت با درصدهای مختلف ۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCNTs) به روش ریخته‌گری اغتشاشی تولید گردید. برای این منظور ابتدا آلیاژ آلومینیم A356 در دمای 850°C ذوب گردید و در خارج از کوره نانولوله‌های کربنی به آن اضافه شد و به وسیله همزن پره‌دار با سرعت ۱۲۰ rpm به مدت ۳۰ s بهم زده شد و در حین اختلاط در قالب‌های ماسه‌ای استوانه‌ای شکل به قطر ۲ cm و ارتفاع ۱۰ cm ریخته‌گری شدند. به منظور بررسی خواص کامپوزیت‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی، سختی سنج راکول و دستگاه آزمایش خوردگی به روش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محلول ۳/۵ wt.% NaCl استفاده گردید. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌ها نشان داد که با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی از ۰/۵ تا ۲/۵٪ از مقدار ترک‌های شکست کاسته شده و همچنین طرح فنجان و مخروط ناشی از تغییر شکل نرم روی سطح شکست کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از آزمایش سختی سنجی و پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نیز نشان داد که با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی از ۰ تا ۲/۵٪، سختی نمونه از حدود ۶۰ RB به حدود ۸۸ RB و جریان خوردگی از ۶/۲- به $4/8 \text{ A/cm}^2$ افزایش می‌یابد. با توجه به این نتایج مشخص گردید که با آنکه افزایش نانولوله‌های کربنی باعث افزایش سختی کامپوزیت می‌گردد ولی در محیط‌های حاوی یون کلر باید با دقت بیشتری مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پلاریزاسیون، سختی سنجی، جریان خوردگی، نانولوله‌های کربنی.

۱- مقدمه

و نیز پایداری شیمیایی خوب، در کاربردهای متنوعی نظیر ساخت کامپوزیت‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴-۱]. افزودن مقادیر بسیار جزئی از نانولوله‌های کربنی به فلزات نرم نظیر آلیاژهای آلومینیم، می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر استحکام

پس از کشف نانولوله‌های کربنی در سال ۱۹۹۱ و بدلیل خواص فوق‌العاده ساختاری، مکانیکی، حرارتی و الکتریکی

* **عهده‌دار مکاتبات:** سید رحیم کیا حسینی

نشانی: دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دامغان، دانشکده فنی و مهندسی، کد پستی ۳۶۷۱۶۳۹۹۹۸

تلفن: ۰۲۳-۳۵۲۲۵۰۶۷، **دورنگار:** ۰۲۳-۳۵۲۲۵۰۶۷، **پست الکترونیکی:** rkiahoseyni@damghaniau.ac.ir

[۲۸] به بررسی مکانیزم‌های استحکام‌دهی نانولوله‌های کربنی در زمینه آلومینیم پرداخته‌اند. در تحقیق دیگری الشالاکانی و همکارانش [۲۷] ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت A356/CNTs را مورد بررسی و ارزیابی قرار داده‌اند. چازاری و همکارانش [۲۹] نیز در یک مقاله مروری، تاثیر ذرات تقویت‌کننده نظیر نانولوله‌های کربنی را بر خواص مکانیکی کامپوزیت پایه آلومینیم بررسی نموده‌اند.

در تحقیق حاضر سعی شده است تا کامپوزیت پایه آلومینیم با درصد‌های مختلف نانولوله‌های کربنی به روش ریخته‌گری اغتشاشی تولید و خواص مکانیکی و خوردگی آن مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- فعالیت‌های تجربی

جهت ساخت کامپوزیت A356-MWCNTs از آلیاژ آلومینیم A356 مطابق با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ استفاده گردید. برای این منظور ابتدا آلیاژ در درون کوره تا دمای 850°C ذوب گردید، سپس در خارج از کوره، پودر MWCNTs ($95\% >$, OD:20-30 nm) که در شکل ۱ نشان داده شده است، با نسبت ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ wt.% به آن افزوده شد و توسط همزن پره‌دار فولادی با سرعت ۱۲۰ rpm به مدت ۳۰ s به هم زده شده تا پودر در درون مذاب توزیع گردد. در نهایت همزمان با به هم زدن مذاب، در درون قالب ماسه‌ای به شکل استوانه با قطر ۲ cm و ارتفاع ۱۰ cm ریخته‌گری شد.

به منظور بررسی سطح شکست کامپوزیت‌های تهیه شده، نمونه‌هایی به ارتفاع ۵ cm برش داده شدند و توسط نیروی فشاری توسط پرس هیدرولیک شکسته شدند و سطح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت.

به منظور بررسی سطح شکست کامپوزیت‌های تهیه شده، نمونه‌هایی به ارتفاع ۵ cm برش داده شدند و توسط نیروی فشاری توسط پرس هیدرولیک شکسته شدند و سطح

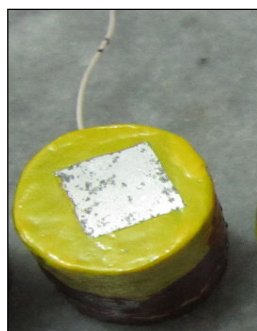
کششی و مقاومت سایشی آن داشته باشد [۵،۶]. تحقیقات مختلفی بر ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری و زمینه سرامیکی در حضور نانولوله‌های کربنی صورت گرفته است تا خواص آنها را بهبود بخشند [۷-۱۱]، ولی تحقیقات کمی روی کامپوزیت‌های پایه فلزی انجام شده است. به عنوان مثال زنگ و همکارانش [۱۲] روی ساخت کامپوزیت‌های پایه فلزی با توزیع همگن نانولوله‌های کربنی تحقیق کرده‌اند. آنها بیان کرده‌اند که نانولوله‌های کربنی به سادگی آگلومره می‌شوند که این مسئله ناشی از اختلاف کشش سطحی و دانسیته زمینه فلزی با آنها می‌باشد [۱۳]. روش‌های مختلفی نظیر همزدن اصطکاکی [۱۴،۱۵]، نفوذ [۱۶،۱۷]، متالورژی پودر [۱۸-۲۰]، روش پودر نیمه جامد [۲۱،۲۲] و ریخته‌گری اغتشاشی [۲۳،۲۴] به منظور تولید کامپوزیت‌های پایه آلومینیم تقویت شده با نانولوله‌های کربنی پیشنهاد شده است. روش متداول تولید این نوع کامپوزیت‌ها روش متالورژی پودر می‌باشد، ولی این روش بدلیل مقدار تولید و پروسه طولانی‌تر تولید و در نتیجه هزینه بالاتر نسبت به ریخته‌گری اغتشاشی، چندان مناسب نمی‌باشد [۲۵]. در مقابل، پروسه ریخته‌گری اغتشاشی روش متداول ارزان جهت ساخت قطعات کامپوزیتی بزرگ نسبت به سایر روش‌های تولید می‌باشد. با این اوصاف، به دلایل ذیل فقط محققان اندکی از روش ریخته‌گری اصطکاکی برای تولید این کامپوزیت‌ها استفاده نموده‌اند [۲۶،۲۷]:

اولاً: نانولوله‌های کربنی بسیار سبک‌تر از فلزات صنعتی هستند و به سادگی به وسیله مذاب آلیاژ تر نمی‌شوند. ثانیاً: بدلیل برهمکنش واندوالسی، به سادگی آگلومره می‌گردند.

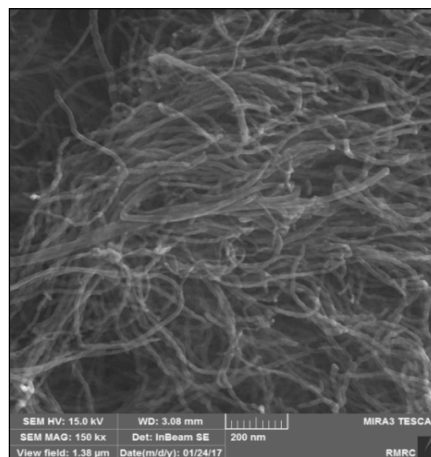
به همین دلایل تحقیقات کمی روی خواص کامپوزیت‌های پایه آلومینیم تقویت شده توسط نانولوله‌های کربنی صورت گرفته است. به‌طور کل، اکثر تحقیقات انجام شده بر روی کامپوزیت A356/CNTs روی خواص مکانیکی و فیزیکی آن معطوف بوده و کمتر به رفتار شیمیایی و الکتروشیمیایی آن پرداخته شده است. به عنوان مثال پارک و همکارانش

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم A356 مورد استفاده جهت ساخت کامپوزیت A356/CNTs.

عنصر	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	V	Sb
آلیاژ ریخته‌گری شده (wt.%)	۹۲/۰۶	۷/۰۱	۰/۰۷۱۱	۰/۰۲۰۶	۰/۰۱۴۱	۰/۴۲۵	<۰/۰۳	۰/۱۸	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۴
ASTM B26/B26 M-09 (wt.%)	Bal.	۶/۵۰	<۰/۲۰	<۰/۲۰	<۰/۱۰	-۰/۲۵ ۰/۴۵	<۰/۱۰	<۰/۲۰				بقیه عناصر <۰/۱۵		



شکل ۲: تصویر نمونه‌های کامپوزیت A356-MWCNTs لاک زده شده برای تست خوردگی.



شکل ۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانولوله‌های کربنی مورد استفاده جهت ساخت کامپوزیت A356-MWCNTs.

پتانسیودینامیک استفاده گردید. روش پتانسیودینامیک برای تمامی نمونه‌ها با درصد‌های مختلف نانولوله‌های کربنی انجام شد. برای این منظور از دستگاه پتانسیواستات مدل OrigaFlex-OGF500 استفاده شد و از محلول NaCl ۳/۵ wt.% به عنوان محلول خورنده استفاده گردید. از یک میله پلاتینی به قطر ۲ mm و طول ۴ mm به عنوان الکترود شمارنده استفاده شد. برای اندازه‌گیری پتانسیل نیز از الکترود کالومل اشباع (SCE) استفاده گردید. قبل از شروع هر آزمایش برای رسیدن به پایداری مناسب، نمونه‌ها به مدت ۱ ساعت در محلول آزمایش قرار داده شدند. سرعت روبش پتانسیل برای تمامی نمونه‌ها ۱ mV/sec در نظر گرفته شد. در آزمون‌های خوردگی ارتباط با دستگاه توسط رایانه و نرم‌افزار origa master برقرار شده بود و تجزیه و تحلیل منحنی‌های پتانسیودینامیک توسط رسم شیب تافل در مناطق خطی منحنی پلاریزاسیون انجام گرفت. از منحنی‌های پتانسیودینامیک پارامترهای پتانسیل خوردگی (E_{corr}) و چگالی جریان خوردگی (I_{corr}) استخراج شد.

شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت.

به منظور ارزیابی سختی نمونه‌ها، قرص‌هایی با ارتفاع ۱ cm از کامپوزیت‌های ریخته‌گری شده تهیه شد و پس از آماده‌سازی سطحی و صیقل کاری به روش سختی‌سنجی راکول B مورد ارزیابی قرار گرفتند.

در نهایت جهت بررسی رفتار خوردگی کامپوزیت‌ها، نمونه‌های ریخته‌گری شده تحت عملیات صیقل کاری سطحی، از سمباده ۲۴۰ تا سمباده ۲۵۰۰ قرار گرفتند و پولیش کاری شدند. سپس مطابق شکل ۲، نمونه‌ها توسط لاک پلیمری به گونه‌ای عایق‌بندی شدند که فقط 1 cm^2 آنها در تماس با محلول خورنده باشد و سیم اتصال از بدنه نمونه‌ها خارج گردد.

جهت بررسی رفتار خوردگی نمونه‌ها، از روش پلاریزاسیون

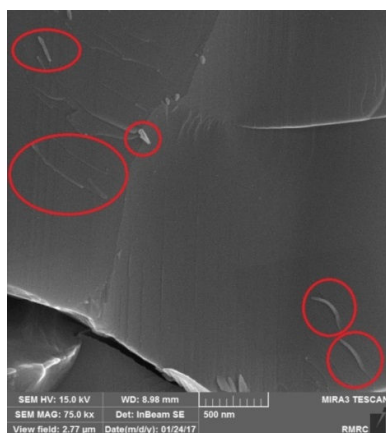
۳- نتایج و بحث

تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح شکست نمونه‌های کامپوزیت A356-MWCNTs با درصدهای مختلف نانولوله‌های کربنی در شکل ۳ نشان داده شده است. نانولوله‌های کربنی خارج شده از سطح شکست، در تصویر با دایره نمایش داده شده‌اند. مشاهده می‌گردد که نانولوله‌ها توسط زمینه آلیاژ آلومینیم A356 به خوبی احاطه شده‌اند و جهت آنها به صورت تصادفی توزیع شده است. همچنین مشاهده می‌گردد که نانولوله‌های کربنی از درون زمینه خارج شده‌اند که نشان دهنده فصل مشترک با چسبندگی ضعیف بین آنها و زمینه آلومینیم است. نتایج مشابهی در تحقیق یان و همکارانش [۳۰] بر کامپوزیت A356/CNTs با درصد وزنی کمتر از ۰/۴٪ نیز مشاهده شده است. همچنین مشاهده می‌گردد در شکل ۳-الف ترک‌های عمیقی در حول محل استقرار نانولوله‌های کربنی ایجاد شده است که مبین مکانیزم انحراف ترک در هنگام شکست کامپوزیت می‌باشد. با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی تا ۰/۲/۵٪، موانع بیشتری در مسیر رشد ترک به وجود می‌آید لذا رشد ترک با مشکل بیشتری مواجه می‌گردد، در نتیجه از درصد ترک‌های عمیق در این نمونه‌ها کاسته شده است.

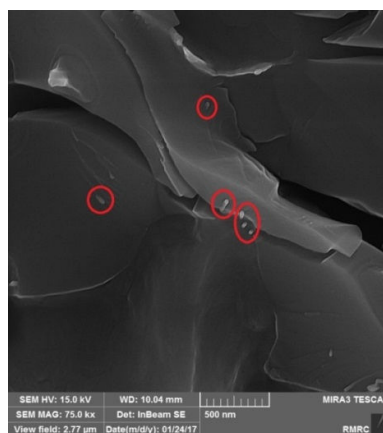
سطح شکست نمونه‌ها در بزرگنمایی $\times 5000$ در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی از ۰/۵ تا ۰/۲/۵٪، اولاً از مقدار ترک‌های توزیع شده در کامپوزیت کاسته شده و حوزه‌های بزرگتری در بین ترک‌ها قابل مشاهده است و ثانیاً از مقدار تغییر شکل‌های سطحی فنجان‌ی و مخروطی شکل کاسته شده است که در واقع نشان دهنده کاهش مقدار تغییر شکل کامپوزیت قبل از شکست می‌باشد. این مساله نشان دهنده کاهش چقرمگی با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی در زمینه آلومینیم می‌باشد. در واقع نانولوله‌های کربنی به عنوان موانعی در مقابل سیلان زمینه عمل می‌نمایند و مانع تغییر شکل کامپوزیت می‌شوند که می‌تواند بر خواص مکانیکی

کامپوزیت تاثیر بسزایی داشته باشد. در هنگام تغییر شکل و حرکت نابعجایی‌ها، نانولوله‌های کربنی مانع حرکت نابعجایی‌ها در زمینه آلومینیم می‌گردند و در نتیجه تغییر شکل آن را سخت تر می‌کنند.

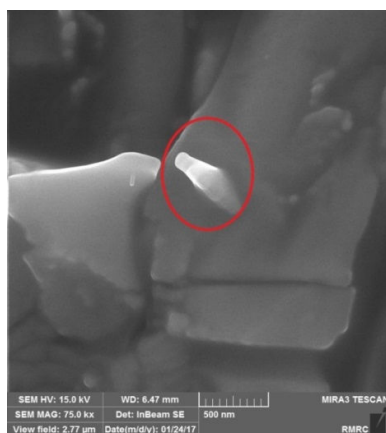
نتایج حاصل از سختی سنجی از نمونه‌های مختلف در شکل ۵، تایید کننده کاهش قابلیت تغییر شکل با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی به زمینه آلومینیم A356 می‌باشد. مشاهده می‌گردد با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی از ۰ تا ۰/۲/۵٪، سختی نمونه‌ها از حدود ۶۰ به حدود ۸۸ RB افزایش می‌یابد که نشان دهنده کاهش نفوذپذیری و قابلیت تغییر شکل کامپوزیت می‌باشد. با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی به عنوان ماده‌ای که دارای استحکام بیشتری نسبت به آلیاژ آلومینیم A356 می‌باشد، باعث می‌گردد تا فرورونده دستگاه سختی‌سنج با موانعی مواجه گردد که به سادگی اجازه نفوذ در داخل کامپوزیت را نمی‌دهند، لذا سختی نمونه افزایش می‌یابد. منصور و همکارانش [۳۱] در تحقیقی روی کامپوزیت A356/CNTs تولید شده به روش ذوب القایی نیز به بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت در درصدهای مختلف نانولوله‌های کربنی پرداخته‌اند و رفتار مشابهی را گزارش کرده‌اند. در تحقیق آنها نیز مشاهده گردیده است که افزودن نانولوله‌های کربنی تاثیر مستقیم روی بهبود رفتار مکانیکی کامپوزیت ساخته شده دارد. رفتار حاصل از پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه آلیاژ آلومینیم A356 و کامپوزیت Al/CNTs با درصدهای مختلف نانولوله‌های کربنی در محلول ۳/۵ wt.% نمک طعام (NaCl) در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی به آلیاژ A356 رفتار غیر فعال شدن (پسیو) به وضوح در شاخه آندی نمودار قابل مشاهده می‌باشد. به طوری که برای نمونه حاوی ۰/۲/۵٪ نانولوله‌های کربنی، رفتار پسیو در پتانسیل حدود ۰/۸۳۷- بر حسب پتانسیل نیم پیل کالومل اشباع، به وضوح قابل مشاهده است که مبین تشکیل لایه محافظ روی کامپوزیت در این پتانسیل است.



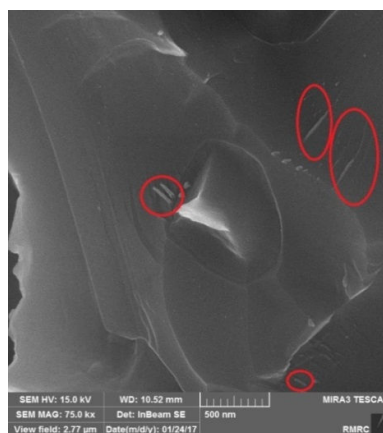
(ب)



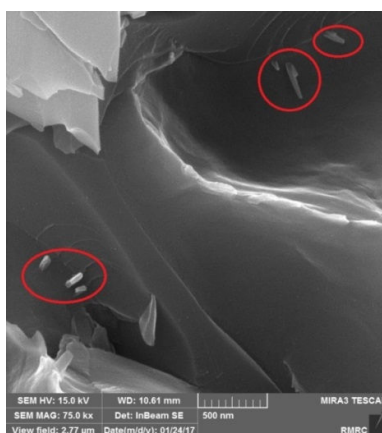
(الف)



(د)

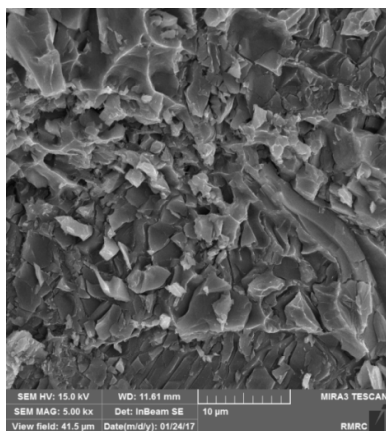


(ج)

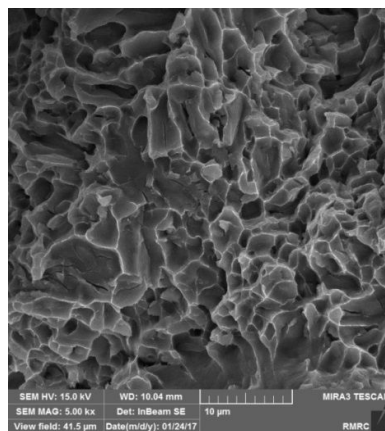


(ه)

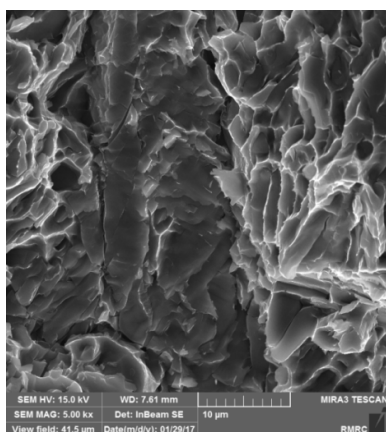
شکل ۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از توزیع نانولوله‌های کربنی در زمینه آلومینیم A356 با درصد‌های وزنی مختلف، الف) ۰/۵٪، ب) ۱٪، ج) ۱/۱۰٪، د) ۲٪ و ه) ۲/۵٪.



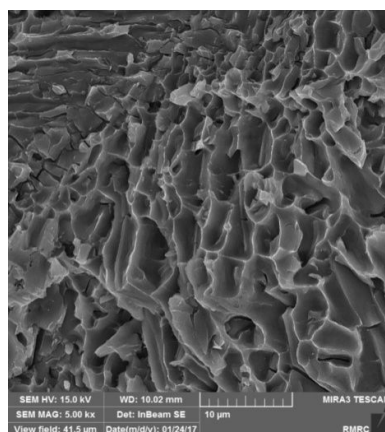
(ب)



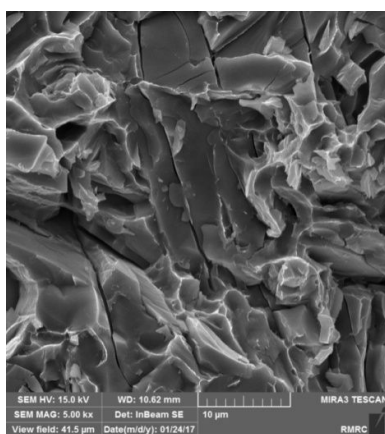
(الف)



(د)

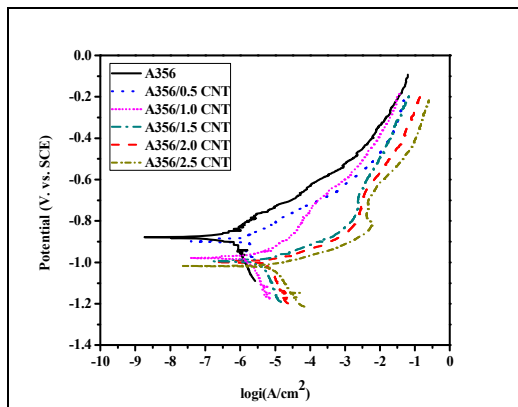


(ج)

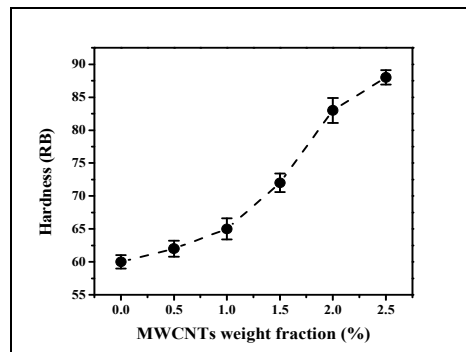


(ه)

شکل ۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از سطح شکست کامپوزیت زمینه آلومینیم A356 با درصد‌های وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی، (الف) ۰/۰٪، (ب) ۱٪، (ج) ۱/۵٪، (د) ۲٪، (ه) ۲/۵٪.



شکل ۶: منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک کامپوزیت A356/CNTs با درصد‌های مختلف نانولوله‌های کربنی در محلول ۰.۳ wt.% NaCl



شکل ۵: سختی کامپوزیت زمینه آلومینیم A356 با درصد‌های وزنی مختلف نانولوله‌های کربنی، (الف) ۰/۵٪، (ب) ۱٪، (ج) ۱/۵٪، (د) ۲٪ و (ه) ۲/۵٪.

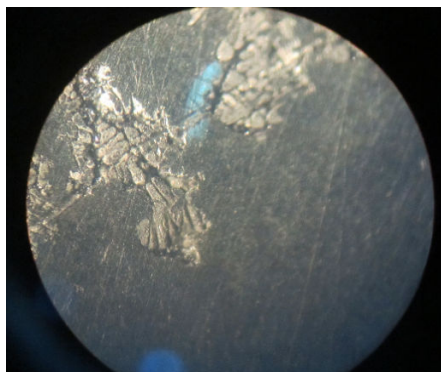
با بررسی رفتار دانسیته جریان خوردگی در شکل ۸-ب این رفتار توجیه می‌گردد. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی، دانسیته جریان خوردگی به وضوح افزایش یافته است. در واقع همانطور که ذکر شد بدلیل اینکه واکنش احیا روی نانولوله‌های سطحی صورت می‌گیرد، باعث تشدید واکنش آندی شده در نتیجه شدت جریان خوردگی نیز افزایش می‌یابد. رفتار مشابهی در تحقیق سان و همکارانش [۳۲] روی کامپوزیت Al-Si نیز مشاهده شده است.

همانطور که قبلاً بیان شد، با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی، رفتار غیرفعال شدن واضح‌تر قابل مشاهده است که تشکیل لایه اکسیدی مقاوم ناشی از واکنش شدیدتر خوردگی می‌باشد. در نتیجه می‌توان بیان نمود که ساخت کامپوزیت A356/CNTs با هدف بهبود خواص مکانیکی، باید با رعایت احتیاط لازم در حضور یون کلر مورد استفاده قرار گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق خواص مکانیکی و الکتروشیمیایی کامپوزیت پایه آلومینیم A356 تقویت شده بوسیله نانولوله‌های کربنی با درصد‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵٪ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و نتایج ذیل بدست آمد:

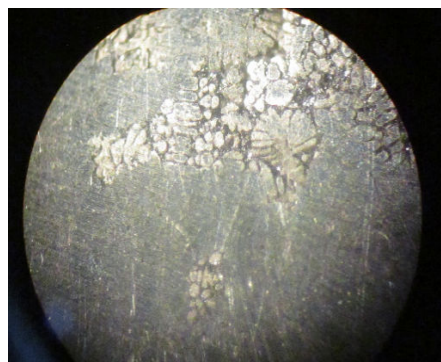
این لایه تا پتانسیل حدود $V_{0/69}$ باعث کاهش سرعت خوردگی شده و در پتانسیل‌های بالاتر تخریب گشته یا به عبارتی لایه محافظ دچار پدیده حفره‌دار شدن شده است. شایان ذکر است با توجه به این نتایج و نیز تصاویر میکروسکوپ نوری تهیه شده از سطح نمونه‌های مورد آزمایش خوردگی در شکل ۷، می‌توان تشکیل و حضور حفره در همه نمونه‌ها را مشاهده نمود، ولی شدت حفره‌دار شدن با افزایش نانولوله‌های کربنی افزایش یافته است که نشان‌دهنده تبدیل مکانیزم خوردگی یکنواخت به خوردگی موضعی با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی می‌باشد. در واقع بدلیل اینکه نانولوله‌های کربنی به عنوان کاتدهای موضعی ایفای نقش می‌نمایند، لذا می‌توانند در افزایش شدت تخریب موضعی زمینه آلومینیم (آند موضعی) تأثیر گذار باشند و در درصد‌های بالای نانولوله‌های کربنی باعث افزایش جریان خوردگی و به تبع آن تشکیل لایه پسیو روی سطح نمونه‌ها ایجاد نمایند. نتایج حاصل از تحلیل شیب تافل نمونه‌های مورد آزمایش در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی، پتانسیل خوردگی منفی‌تر شده است. به عبارتی افزودن نانولوله‌های رفتار آندی نمونه‌ها شده است. این مسأله را می‌توان ناشی از تشکیل آندهای موضعی روی سطح نمونه‌ها دانست که از پدیده واکنش‌های احیایی روی سطوح نانولوله‌ها ناشی می‌گردد.



(ب)



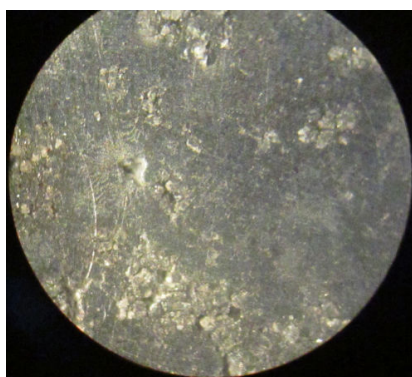
(الف)



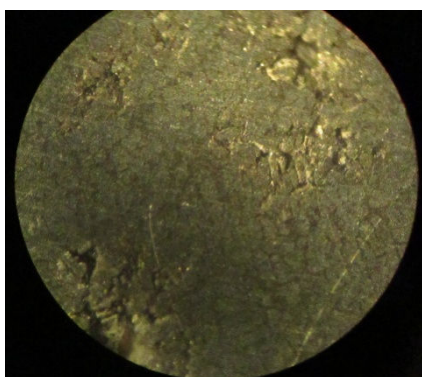
(د)



(ج)



(و)

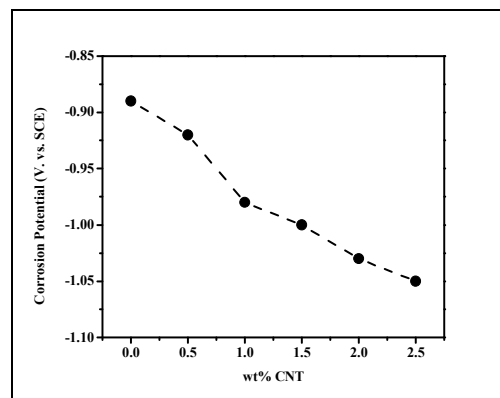


(ه)

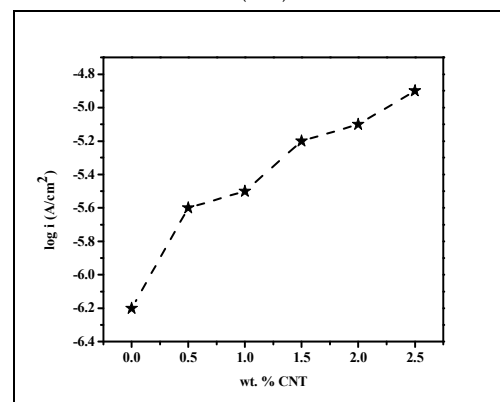
شکل ۷: تصاویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه‌های A356 با درصد‌های مختلف نانولوله‌های کربنی با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر بعد از آزمایش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، (الف) A356، (ب) A356/0.5% CNTs، (ج) A356/1% CNTs، (د) A356/1.5% CNTs، (ه) A356/2% CNTs و (و) A356/2.5% CNTs.

مراجع

- [1] Y. Xuan, L. Nastac, "Microstructure Characteristics of A356 Nanocomposites Manufactured via Ultrasonic Cavitation Processing Under Controlled Solidification Conditions", TMS 2017 146th Annual Meeting and Exhibition Supplemental Proceedings, San Diego California, USA, 2017.
- [2] J. Babu, A. Srinivasan, C. Kang, *Journal of Composite Materials*, **51**, 2017, 1631.
- [3] سمیه فرهنگیان دهقان، فریده گلپابایی، بزرگمهر مداح، مسعود لطیفی، حمید پزشکی، مهدی حسن‌زاده، "ارزیابی اثر نانولوله‌های کربنی تک جداره بر میزان تخلخل فیلترهای نانولیفی بی‌یافت"، *مجله علمی-پژوهشی نانومواد*، شماره ۲۲، ۱۳۹۴، ۷۷-۷۵.
- [4] نجمه ابزاهیمی کولایی، علی اکبر آشکاران، محمد اکبرزاده پاشا، "ساخت و مشخصه‌یابی کامپوزیت رزورسینول آتروژل و نانولوله‌های کربنی چند جداره"، *مجله علمی-پژوهشی نانومواد*، شماره ۲۶، ۱۳۹۵، ۸۹-۸۱.
- [5] M.M. Bastwros, A.M. Esawi, A. Wifi, *Wear*, **307**, 2013, 164.
- [6] R. Khasanova, S. Komarov, V.Y. Zadorozhnyy, *Journal of Alloys and Compounds*, **707**, 2017, 238.
- [7] D.R. Bortz, C. Merino, I. Martin-Gullon, *Composites Science and Technology*, **71**, 2011, 31.
- [8] J.J. Han, D. Su, Z.H. Zhao, X.L. Li, H.M. Ji, X. Yan, Z.G. Jin, *Ceramics International*, **43**, 2017, 9024.
- [9] Y. Yang, C. Ramirez, X. Wang, Z. Guo, A. Tokranov, R. Zhao, I. Szlufarska, J. Lou, B.W. Sheldon, *Carbon*, **115**, 2017, 402-408.
- [10] W. Gao, H. Chai, F. Wu, X. Li, X. Hu, H. Song, *Ceramics International*, **43**, 2017, 5723.
- [11] M. Elias, M.K. Amin, S.H. Firoz, M.A. Hossain, S. Akter, M.A. Hossain, M.N. Uddin, I.A. Siddiquey, *Ceramics International*, **43**, 2017, 84.
- [12] X. Zeng, G. Zhou, Q. Xu, Y. Xiong, C. Luo, J. Wu, *Materials Science and Engineering: A*, **527**, 2010, 5335.
- [13] K.T. Lau, D. Hui, *Carbon*, **40**, 2002, 1605.
- [14] D. Lim, T. Shibayanagi, A. Gerlich, *Materials Science and Engineering: A*, **507**, 2009, 194.
- [15] Q. Liu, L. Ke, F. Liu, C. Huang, L. Xing, *Materials & Design*, **45**, 2013, 343.
- [16] H. Kim, J. Babu, C. Kang, *Materials Science and Engineering: A*, **573**, 2013, 92.
- [17] R. Etemadi, B. Wang, K. Pillai, B. Niroumand, E. Omrani, P. Rohatgi, *Materials and Manufacturing Processes*, 2018, DOI: 10.1080/10426914.2017.1328122.
- [18] A. Esawi, K. Morsi, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **38**, 2007, 646.
- [19] Z. Liu, S. Xu, B. Xiao, P. Xue, W. Wang, Z. Ma, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **43**, 2012, 2161.
- [20] D. Poirier, R. Gauvin, R.A. Drew, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **40**, 2009, 1482.
- [21] Y. Wu, G.Y. Kim, *Journal of Materials Processing Technology*, **211**, 2011, 1347.
- [22] Y. Wu, G.Y. Kim, A.M. Russell, *Materials Science and Engineering: A*, **538**, 2012, 164.
- [23] K.P. So, *Composites Science and Technology*, **74**, 2013, 6.



(الف)



(ب)

شکل ۸: نمودار تغییرات پتانسیل خوردگی و (ب) نمودار تغییرات دانسته جریان خوردگی مربوط به کامپوزیت A356/CNTs با درصد‌های مختلف در محلول ۳/۵ wt.% NaCl

- در بررسی سطح شکست کامپوزیت‌های ریخته‌گری شده مشاهده گردید که با افزایش درصد نانولوله‌های کربنی از ۰/۵ تا ۲/۵٪، از میزان ترک‌های موجود کاسته شده و بدلیل غلبه پدیده انحراف ترک در کامپوزیت، از عمق و شدت ترک‌ها کاسته می‌شود.
- نانولوله‌های کربنی به عنوان موانعی جهت تغییر شکل زمینه آلومینیم عمل می‌نمایند، لذا با افزایش درصد CNTs از میزان تغییر شکل نمونه‌ها کاسته می‌شود.
- با افزایش درصد CNTs به عنوان مکان‌های کاتدی الکتروشیمیایی در تست پلاریزاسیون در محلول ۳/۵ wt.%، شدت جریان زمینه آلومینیم افزایش می‌یابد که منجر به تشکیل لایه پسیو و در نهایت حفره‌دار شدن نمونه‌ها می‌شود.

- [28] S.P. Chaudhary, P. Singh, S. Rai, H. Patel, B. Kumar, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, **4**, 2015, 8377.
- [30] H. Yan, H. *Journal of Materials Research*, **31**, 2016, 2277.
- [31] M. Mansoor, M. Shahid, *Journal of applied research and technology*, **14**, 2016, 215.
- [32] H. Sun, D. Chen, X. Li, N. Ma, H. Wang, *Materials and corrosion*, **60**, 2009, 419.
- [24] S.I. Oh, J.Y. Lim, Y. Kim, J. Yoon, G. Kim, J. Lee, Y. M. Sung, J. Han, *Journal of Alloys and Compounds*, **542**, 2012, 111.
- [25] B.G. Narasimha, V.M. Krishna, A.M. Xavier, *International Journal of Applied Engineering Research*, **8**, 2013, 647.
- [26] B. Abbasipour, B. Niroumand, S.M. Vaghefi, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **20**, 2010, 1561.
- [27] A.B. Elshalakany, T. Osman, A. Khattab, B. Azzam, M. Zaki, *Journal of Nanomaterials*, **2014**, 2014, 1.