



## ارزیابی ساختار، خواص مکانیکی و خوردگی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانوذرات سرامیکی SiC

سیدرضا جعفرپور رضائی\* و محمود پاکشیر

دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، دانشگاه شیراز

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۲/۰۳/۲۹، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۲/۰۶/۲۴، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۲/۰۷/۲۸

### چکیده

در این تحقیق نقش نانوذرات تقویت کننده بر روی خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی نانوکامپوزیت Al/SiC مورد بررسی قرار گرفته است. پودر نانوکامپوزیتی Al/SiC با درصدهای وزنی مختلف فاز تقویت کننده با روش آسیاب مکانیکی تهیه شد. پودر حاصله از فرآیند آسیابکاری ابتدا پرس سرد و پس از آن تحت فرآیند اکستروژن گرم قرار گرفت. بررسی‌های ریزساختار کامپوزیت نشان از توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده داشت و پدیده کلوخه‌ای شدن به میزان کمی در ریزساختار نمونه‌ها مشاهده گردید. آزمایش‌های میکروسختی و کشش نمونه‌ها نشان داد که با افزایش میزان ذرات تقویت کننده، خواص مکانیکی بهبود یافته است. اما بررسی‌های الکتروشیمیایی نشان از کاهش مقاومت به خوردگی نمونه‌ها با افزایش میزان ذرات تقویت کننده داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی، متالورژی پودر، نانوذرات تقویت کننده، سختی، استحکام کششی.

### ۱- مقدمه

استفاده قرار گرفته‌اند [۱-۳]. بیشتر مطالعاتی که تاکنون بر روی کامپوزیت‌ها انجام گرفته است، به بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌ها پرداخته‌اند. اما در مقابل اطلاعات کمی از رفتار خوردگی این مواد در دسترس می‌باشد، که با توجه به کاربرد روز افزون این مواد در صنایع مختلف، لازمه مطالعه و تحقیق در این زمینه افزایش یافته است. اگر چه حضور فاز دوم بعنوان تقویت کننده در زمینه فلزی می‌تواند باعث افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی مواد شود، اما می‌تواند باعث تغییر در رفتار خوردگی آنها شود. در حضور ذرات تقویت کننده این امکان وجود دارد که مقاومت به خوردگی مواد افزایش یا کاهش یابد [۴،۵]. مطالعاتی که تاکنون در رابطه با این

کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی موادی هستند که بوسیله پخش کردن ذرات سخت مانند اکسیدها، کاربیدها، نیتrideها و بوریدها در داخل زمینه آلومینیومی تولید شده‌اند. این مواد به علت داشتن وزن کم، استحکام بالا، ضریب انبساط حرارتی کم، مقاومت به سایش خوب و مدول مشخصه بالا در صنایع هوافضا، نظامی و اتومبیل‌سازی به عنوان پوسته پره‌های چرخ بال، اجزاء پره‌های توربین در محیط‌های دریایی، میله‌های اتصال پیستون، بلوک سیلندر و همچنین به عنوان جایگزینی برای لوله‌های آلومینیومی در صنایع مختلف و غیره مورد

\* عهده‌دار مکاتبات: سیدرضا جعفرپور رضائی

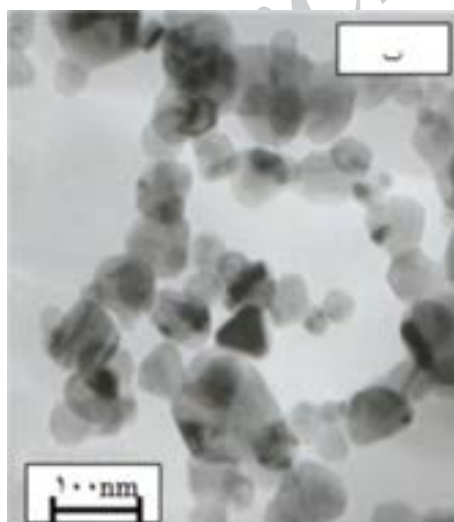
نشانی: شیراز، خیابان زند، دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی

تلفن: ۰۷۱۱-۶۴۷۳۰۰۲، دورنگار: ۰۷۱۱-۶۴۷۳۰۰۲، پست الکترونیکی: reza\_jafar\_poor@yahoo.com

کامپوزیتی به قطر ۷ میلی‌متر تولید گردید. پس از فرآیند اکستروژن به منظور بررسی چگونگی توزیع فاز تقویت کننده در فلز زمینه، ریزساختار نمونه‌ها بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور ابتدا نمونه‌های اکستروژن شده در جهت طولی برش خورده و آماده‌سازی سطحی نمونه‌ها تا سنباده مش ۱۲۰۰ انجام گرفت. در نهایت برای رسیدن به سطحی مناسب عملیات پولیش بر روی نمونه‌ها بوسیله خمیر الماسه انجام شد. سطوح پولیش شده توسط محلول اچانتی که ترکیب آن در جدول شماره ۱ آورده شده است اچ شده و ریزساختار نمونه‌ها بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.



(الف)



(ب)

شکل ۱: تصویر میکروسکوپی پودرهای استفاده شده، (الف) پودر آلومینیوم و (ب) نانوپودر کاربید سیلیسیم.

موضوع صورت گرفته نشان داده است که پارامترهای موثر در خوردگی عبارتند از [۳]:

- اثرات الکتروشیمیایی مربوط به اجزاء سازنده کامپوزیت‌ها

- اثرات الکتروشیمیایی ناحیه بین فازی

- فساد شیمیایی در کامپوزیت‌ها

- عوارض جانبی ناشی از ساختار و فرآیند تولید

برخی از محققین نشان دادند که فاز بین فلزی  $Al_3C_4$  تشکیل شده در نتیجه واکنش بین  $Al$  و ذرات  $SiC$ ، باعث کاهش در مقاومت به خوردگی کامپوزیت‌ها شده‌اند [۶،۷] که نظر آنها مغایر با فرضیات ترادوله و همکارانش [۸] می‌باشد. چونلین و همکارانش [۹] با بررسی رفتار خوردگی کامپوزیت  $Al_2O_3/SiC_p$  نشان دادند که با کاهش اندازه ذرات تقویت کننده، مقاومت به خوردگی کامپوزیت نیز کاهش یافته است. سمیر محمود و همکارانش [۱۰] با مقایسه رفتار خوردگی دو کامپوزیت  $Al/SiC$  و  $Al/Al_2O_3$  به این نتیجه رسیدند که نرخ خوردگی کامپوزیت  $Al/SiC$  نسبت به کامپوزیت  $Al/Al_2O_3$  بیشتر است. هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر افزایش کسر وزنی نانوذرات تقویت کننده کاربید سیلیسیم بر روی خواص مکانیکی و رفتار خوردگی نانوکامپوزیت  $Al/SiC$  تولید شده با فرآیند متالورژی پودر در محیط آب دریا می‌باشد.

## ۲- فعالیت‌های تجربی

در این تحقیق از پودر آلومینیوم با اندازه متوسط ۴۵ میکرومتر برای تشکیل زمینه کامپوزیت و از پودر گوشه‌دار کاربید سیلیسیم با اندازه متوسط ۵۰ نانومتر به عنوان تقویت کننده استفاده شد (شکل ۱). پودرهای نانوکامپوزیتی  $Al/SiC$  حاوی ۲، ۵/۲ و ۵ درصد وزنی فاز تقویت کننده توسط آسیاب سیاره‌ای پر انرژی و در اتمسفر گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۹ درصد به مدت ۱۰ ساعت آسیاب شد. پودر حاصله، پس از فرآیند آسیابکاری پرس سرد و نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۲۷ میلی‌متر تولید شد. جهت رسیدن به فشردگی لازم و حذف تخلخل، نمونه‌های فشرده شده در دمای  $600^\circ C$  تحت فرآیند اکستروژن گرم قرار گرفتند تا در نهایت میله‌های

انجام این آزمایش‌ها، نمونه‌های نانوکامپوزیتی تولید شده به صورت عرضی مقطع زده شده و پس از آن تحت عملیات آماده‌سازی سطحی قرار گرفتند. در انتها و دقیقاً قبل از انجام آزمایشات سطح نمونه‌ها بوسیله آب مقطر و اتانول شستشو داده شد. تمام آزمایش‌ها با استفاده از یک سلول سه الکترودی با الکتروود کمکی از جنس پلاتین، الکتروود Ag/AgCl به عنوان الکتروود مرجع و نمونه‌های نانوکامپوزیتی با سطح مقطع  $0.38$  سانتی‌متر مربع به عنوان الکتروود کاری در محلول آب دریا که طبق استاندارد ASTM D1141 تهیه شده بود، به کمک دستگاه پتانسیوایستات Autolab type III انجام گرفت. منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با نرخ اسکن  $5 \text{ mV/s}$  و در بازه پتانسیلی  $-250$  میلی‌ولت تا  $1100$  میلی‌ولت نسبت به پتانسیل مدار باز رسم شدند. آزمون امپدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل مدار باز و در محدوده فرکانسی  $100 \text{ kHz}$  تا  $10 \text{ mHz}$  و با دامنه طول موج  $10 \text{ mV}$  انجام شد. نتایج حاصل از آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی به صورت منحنی ناپکیویست ثبت شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ریزساختار

ریزساختار نمونه‌های نانوکامپوزیتی Al/SiC که در جهت اکستروژن برش خورده‌اند در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطوریکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود ذرات تقویت کننده به صورت یکنواخت در داخل زمینه آلومینیومی توزیع شده است. همچنین پدیده کلوخه‌ای به میزان کمی در ریزساختار نمونه‌ها مشاهده شده است. بطور کلی یکی از مشکلاتی که با ریز شدن ذرات تقویت کننده بوجود می‌آید افزایش پدیده کلوخه‌ای شدن و چسبیدن ذرات تقویت کننده به یکدیگر است [۱۳]، که این امر موجب کاهش خواص نانوکامپوزیت‌ها می‌گردد. اما در اینجا میزان ذرات تقویت کننده که در آنها پدیده کلوخه‌ای شدن مشاهده شده است کم می‌باشد. که این امر نشان دهنده کنترل دقیق پارامترهای موثر در تولید از قبیل مدت زمان آسیاکاری و میزان اسید استاریک استفاده شده ( $1/5$  وزنی) به عنوان عامل کنترل کننده فرآیند بوده است. از

جدول ۱: ترکیب محلول اچانت [۱۱].

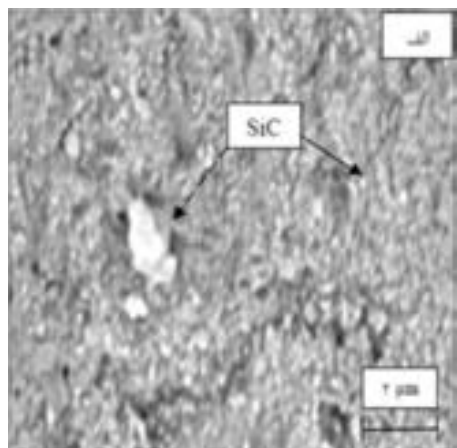
مقدار اجزاء بر حسب cc	اجزاء سازنده محلول اچانت
۱	HF
۱/۵	HCl
۲/۵	HNO <sub>3</sub>
۹۵	H <sub>2</sub> O

جهت اندازه‌گیری میزان تخلخل ابتدا چگالی تئوری نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۱ و چگالی حقیقی آنها با استفاده از روش ارشمیدس محاسبه شد. پس از مشخص شدن چگالی حقیقی و تئوری نمونه‌ها میزان تخلخل نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد [۱۲]:

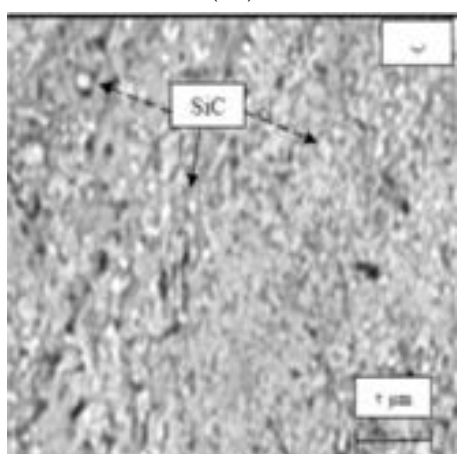
$$D_{th} = V_m D_m + V_r D_r \quad (1)$$

$$\%P = \frac{D_{th} - D_{re}}{D_{th}} \times 100 \quad (2)$$

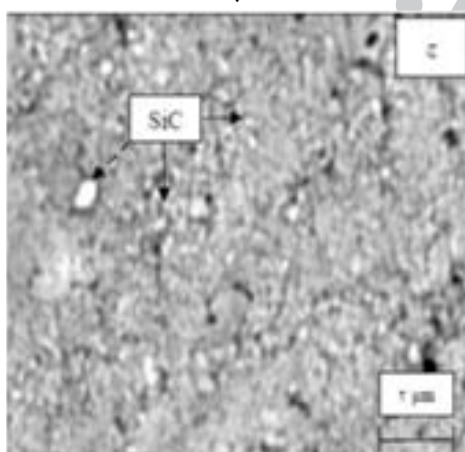
که در روابط فوق  $D_m$  و  $D_r$  به ترتیب چگالی فلز زمینه و ذرات تقویت کننده،  $V_r$  و  $V_m$  به ترتیب نسبت حجمی فلز زمینه و فاز تقویت کننده،  $D_{th}$  چگالی تئوری نمونه‌ها،  $D_{re}$  چگالی حقیقی نمونه‌ها،  $\%P$  میزان تخلخل موجود در ساختار می‌باشند. جهت بررسی سختی نمونه‌ها، آزمون سختی سنجی میکرو ویکرز با باری معادل  $25$  گرم توسط دستگاه میکرو سختی‌سنج کوپا مدل MH1 انجام گرفت. برای انجام این آزمون هفت نقطه اثر در جهت طولی و پنج نقطه اثر در جهت عرضی نمونه‌ها گرفته شد. جهت بررسی خواص کششی نانوکامپوزیت‌های تولیدی، از نمونه‌های استوانه‌ای شکل به قطر  $4$  میلی‌متر و طول گیج  $30$  میلی‌متر استفاده شد. آزمون کشش با استفاده از دستگاه کشش Santam مدل STM-150 انجام گرفت. پس از شکست نمونه‌ها، افزایش طول شکست ( $\%El_f$ )، میزان کاهش در سطح مقطع ( $\%RA$ )، و استحکام کششی نمونه‌ها (UTS) اندازه‌گیری شد و سطوح شکست بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت. جهت بررسی رفتار خوردگی نمونه‌های تولیدی، از آزمون‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. جهت



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲: تصویر ریزساختار نمونه‌های نانوکامپوزیتی،  
 (الف) Al/2% SiC، (ب) Al/2.5% SiC و (ج) Al/5% SiC

### ۳-۳- بررسی خواص مکانیکی

نتایج آزمایش‌های سختی و کشش که در جدول ۳ آورده شده است، نشان می‌دهد که با افزایش میزان نانوذرات تقویت کننده در ساختار کامپوزیت، عدد سختی و

طرف دیگر طی فرآیند اکستروژن ذرات تقویت کننده که به شکل کلوخه‌ای درآمده‌اند بدلیل کاهش سطح مقطع نمونه‌ها دچار شکست شده‌اند و به شکل یکنواختی در زمینه کامپوزیت پخش شده‌اند.

### ۳-۲- تخلخل

میزان تخلخل نقش مهمی را در تعیین خواص مکانیکی و خوردگی نمونه‌ها بر عهده دارد. یکی از ویژگی‌های نمونه‌های تولید شده به روش متالورژی پودر وجود تخلخل زیاد در ساختار نمونه‌ها می‌باشد. از آنجایی که شرایط مطلوب برای ما این است که میزان تخلخل را به حداقل برسانیم، با انجام فرآیندهای ثانویه مانند اکستروژن سعی می‌شود تا میزان تخلخل نمونه‌های تولید شده کاهش یابد. در جدول ۲ دانسیته تئوری، دانسیته حقیقی و میزان تخلخل نمونه‌های تولید شده بعد از فرآیند اکستروژن، جمع‌آوری شده است. همانگونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود با افزایش میزان ذرات تقویت کننده، میزان تخلخل موجود در ساختار تا حدودی افزایش می‌یابد. دلیل این امر، این است که افزایش میزان ذرات تقویت کننده موجب عدم سیلان مناسب فاز زمینه هنگام فرآیند اکستروژن می‌شود و همین امر موجب آن می‌شود تا در اطراف ذرات تقویت کننده حفره‌هایی بوجود آید و درصد تخلخل افزایش یابد.

جدول ۲: مقدار چگالی تئوری، حقیقی و

تخلخل نمونه‌های نانوکامپوزیتی.

Sample	$D_{th}$ ( $g.cm^{-3}$ )	$D_{re}$ ( $g.cm^{-3}$ )	%P
Al-2% wt. SiC	۲/۷۰۸۶	۲/۵۸۹۱	۴/۴۱
Al-2.5% wt. SiC	۲/۷۱۰۸	۲/۵۸۹۸	۴/۴۶
Al-5% wt. SiC	۲/۷۲۱۶	۲/۵۶۵۱	۵/۷۵

از طرفی دیگر با افزایش میزان ذرات تقویت کننده میزان مناطق کلوخه‌ای شده افزایش می‌یابد و همانطوریکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در این مناطق، در فصل مشترک زمینه/تقویت کننده شاهد تخلخل و حضور شکاف‌هایی هستیم که این امر نیز می‌تواند سبب افزایش میزان تخلخل در ساختار باشد.

جدول ۳: نتایج آزمون میکروسختی و کشش.

Sample	Hardness (HV)	UTS (MPa)	%E <sub>f</sub>	%RA
Al-2% wt. SiC	۹۷	۳۰۰/۶	۱۰/۵۰	۱۰/۲۲
Al-2.5% wt. SiC	۱۰۸	۳۴۹/۵	۹/۳۳	۸/۸۰
Al-5% wt. SiC	۱۱۵	۳۷۹/۴	۷/۸۶	۷/۸۴

### ۳-۴- رفتار خوردگی

منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است. نتایج استخراج شده از این منحنی‌ها در جدول ۴ گردآوری شده است. که در آن: پتانسیل خوردگی ( $E_{corr}$ )، دانسیته جریان خوردگی ( $i_{corr}$ )، پتانسیل حفره‌دار شدن ( $E_{pit}$ ) و میزان پایداری نمونه تا حفره دار شدن ( $\Delta E$ ) که برابر است با  $E_{pit}-E_{corr}$  همانطوریکه نتایج حاصل از آزمایشات پتانسیودینامیک نشان می‌دهد، پتانسیل خوردگی نمونه‌ها تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند. اما در مقابل دیده شد که با افزایش میزان ذرات تقویت کننده، دانسیته جریان خوردگی نمونه‌ها به شدت افزایش یافته است. بطوریکه دانسیته جریان خوردگی برای کامپوزیت حاوی ۵٪ نانوذرات کاربید سیلسیم حدوداً ۴ برابر کامپوزیت حاوی ۲٪ نانوذرات است. از طرفی دیگر دیده شد که با افزایش ذرات تقویت کننده پتانسیل حفره‌دار شدن به سمت پتانسیل‌های فعال‌تر حرکت کرده است. این دو عامل نشان دهنده این است که با افزایش میزان ذرات تقویت کننده مقاومت در برابر خوردگی کاهش یافته است. نتایج آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی به صورت منحنی نایکویست در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطوریکه در شکل ۵ مشخص می‌باشد منحنی نایکویست تمامی نمونه‌ها دارای رفتاری مشابه می‌باشند. با افزایش درصد وزنی ذرات تقویت کننده قطر نیم دایره، که نشان دهنده مقاومت پلاریزاسیون و در نتیجه مقاومت به خوردگی است، کاهش یافته است. یعنی با افزایش میزان ذرات تقویت کننده، مقاومت به خوردگی کاهش یافته است و این نشان می‌دهد که نتایج آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی تایید کننده نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک می‌باشد.

استحکام کششی نمونه‌ها افزایش یافته است. اما در مقابل پارامترهای مربوط به شکل‌پذیری یعنی میزان افزایش طول و میزان کاهش در سطح مقطع، کاهش یافته است. دلیل افزایش سختی با افزایش میزان ذرات تقویت کننده به خاطر اضافه شدن فاز سخت و ترد SiC به ساختار و همچنین به علت توزیع یکنواخت آن در ساختار می‌باشد [۱۴].

افزایش استحکام نانوکامپوزیت‌ها را می‌توان به خاطر، نرخ کار سختی بالای کامپوزیت در کرنش‌های کم دانست، که این افزایش در کارسختی تحت تاثیر خواص الاستیک نانوذرات تقویت کننده SiC و ممانعت آنها از تغییر شکل پلاستیک زمینه است. زیرا ذرات SiC فقط قابلیت تغییر فرم الاستیک را دارند، در حالیکه زمینه آلومینیومی می‌تواند تغییر فرم پلاستیک دهد، در نتیجه ذرات تقویت کننده در برابر تغییر فرم پلاستیک زمینه ممانعت ایجاد کرده و باعث افزایش کارسختی زمینه می‌شوند. اما دلیل اصلی استحکام بالای این دسته از مواد به سبب افزایش دانسیته نابعایی در آنها است. علت این پدیده، اختلاف در ضریب انبساط حرارتی بین ذرات تقویت کننده و فلز زمینه است [۱۵، ۱۶]. با افزایش میزان نانوذرات تقویت کننده در ساختار، چگالی نابعایی‌ها نیز افزایش می‌یابد. از سویی دیگر با افزایش میزان نانوذرات تقویت کننده، فاصله بین این ذرات که همانند یک سد بر سر راه حرکت نابعایی‌ها عمل می‌کنند کمتر می‌شود. از آنجایی که طبق مکانیزم اروان تنش لازم برای عبور نابعایی از بین ذرات متناسب با معکوس فاصله بین ذرات است، تنش بیشتری برای عبور نابعایی از ذرات لازم است و همین امر سبب افزایش استحکام در نانوکامپوزیت‌ها با افزایش میزان نانوذرات تقویت کننده شده است.

تصاویر میکروسکوپی سطح شکست که در شکل ۳ به تصویر در آمده است، حفرات ریزی را بر روی سطوح شکست نمایش می‌دهد که احتمالاً محل جوانه‌زنی این حفرات از کنار ذرات تقویت کننده است. با پیشروی این حفرات و رسیدن آنها به یکدیگر نمونه دچار شکست خواهد شد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ذرات تقویت کننده تعداد این حفرات نیز بر روی سطح شکست بیشتر شده است.

حضور حلقه القایی در منحنی‌های نایکویست عمدتاً نشان دهنده جذب سطحی آنیون در فصل مشترک فلز/محللول است [۱۷]. یکی از مضرترین آنیون‌های حاضر در محللول الکترولیت یون کلراید می‌باشد، که نقش بسیار موثری در خوردگی حفره‌ای آلومینیوم و آلیاژهای آن دارد و جذب یون کلر اولین مرحله شروع خوردگی موضعی می‌باشد. پس می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌های مورد آزمایش همگی مستعد به خوردگی موضعی می‌باشند. که این مطلب در شکل ۶ (الف، ب و ج) که تصویر میکروسکوپی سطوح خورده شده را نشان می‌دهد به وضوح قابل مشاهده است.

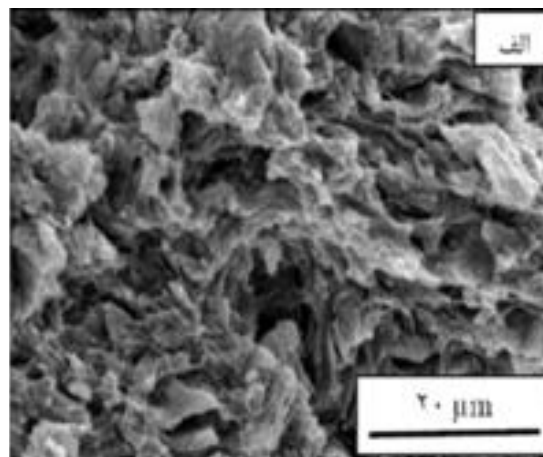
جدول ۴: نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک.

sample	$E_{corr}$ (mV)	$i_{corr}$ ( $\mu A.cm^{-2}$ )	$E_{pit}$ (mV)	$\Delta E$ (mV)
Al+2% SiC	-۷۳۵	۴/۱۶	-۵۴۷	۱۸۸
Al+2.5% SiC	-۷۲۸	۱۰/۵۲	-۶۱۰	۱۱۸
Al+5% SiC	-۷۳۶	۱۷/۶۶	-۶۲۵	۱۱۱

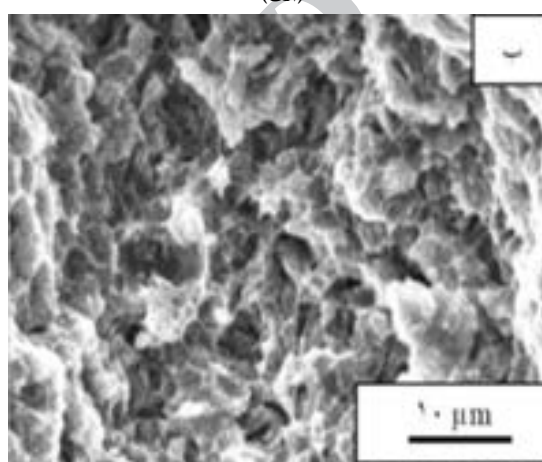
بطور کلی در محلول‌های آبی، مقاومت به خوردگی آلومینیوم و آلیاژهای آن وابسته به لایه محافظ اکسیدی است که بر روی آن شکل می‌گیرد. اما در محیط‌های حاوی یون کلر مانند آب دریا، آلومینیوم و آلیاژهای آن مستعد به خوردگی موضعی، مخصوصاً خوردگی حفره‌ای می‌باشند [۳، ۱۸]. چون یون کلری که جذب لایه محافظ سطحی شده است با آن طبق رابطه ۳ واکنش می‌دهد که محصول واکنش کلراید هیدروکسید آلومینیوم می‌باشد که قابل انحلال می‌باشد.



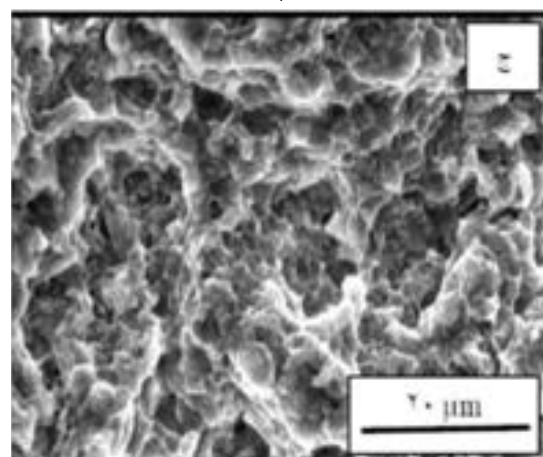
در نتیجه لایه محافظ اکسیدی شروع به حل شدن می‌نماید و در نتیجه در نهایت یون کلر به سطح عریان فلز می‌رسد و باعث ایجاد خوردگی موضعی در آن می‌شود. البته مقاومت در برابر خوردگی حفره‌ای علاوه بر میزان غلظت یون کلر موجود در محلول به فاکتورهای متعدد دیگری از جمله ترکیب شیمیایی آلیاژ، تاریخچه عملیات حرارتی، حضور ذرات ثانویه در ریزساختار، فرآیند تولید، شرایط محیطی و غیره نیز بستگی دارد [۴، ۱۹].



(الف)



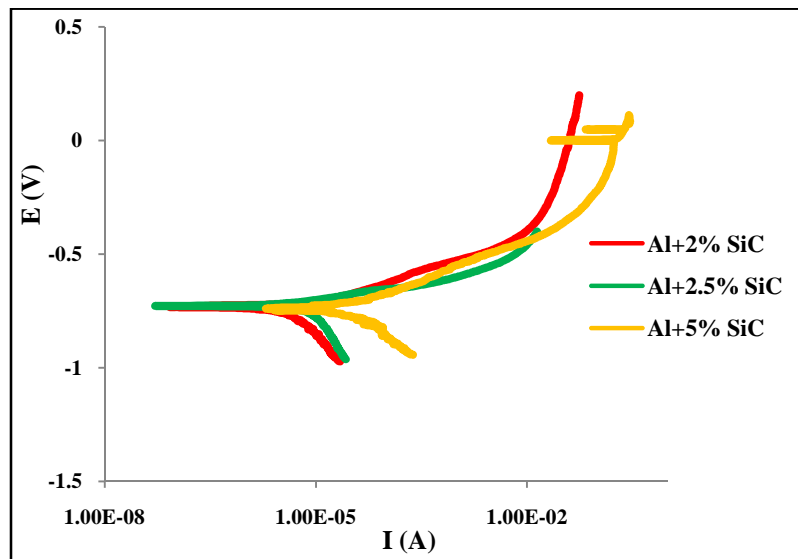
(ب)



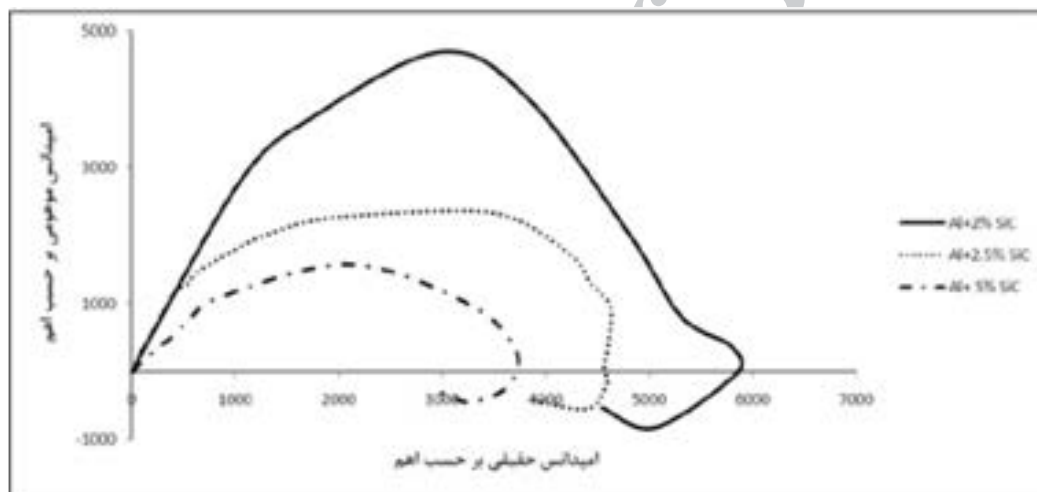
(ج)

شکل ۳: تصویر سطح شکست نمونه‌های نانوکامپوزیتی،  
Al/2% SiC (الف)، Al/2.5% SiC (ب) و Al/5% SiC (ج)

یکی از نکات دیگری که در نمودارهای نایکویست قابل مشاهده است وجود حلقه القایی در فرکانس‌های پایین می‌باشد. این حلقه در منحنی‌های نایکویست تمام نمونه‌های مورد آزمایش به وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۴: منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های نانوکامپوزیتی.



شکل ۵: منحنی نایکوئیست نمونه‌های نانوکامپوزیتی.

می‌یابد. این مکانیزم به صورت شماتیک در شکل ۷ آورده شده است.

از عوامل مهم دیگری که در کاهش مقاومت به خوردگی نانوکامپوزیت Al/SiC، با افزایش ذرات تقویت کننده نقش دارند می‌توان به دو مورد زیر اشاره کرد:  
الف) مشاهده شد که با افزایش میزان ذرات تقویت کننده، میزان تخلخل افزایش یافته است که خود می‌تواند یکی از عوامل اصلی افزایش نرخ خوردگی باشد.  
ب) افزودن نانوذرات تقویت کننده به زمینه فلزی، باعث افزایش تنش داخلی در نانوکامپوزیت‌ها به سبب شکل‌گیری

در نتیجه هر عاملی که سبب شود، یون کلر راحت‌تر به سطح فلز برسد، می‌تواند باعث کاهش مقاومت به خوردگی شود. افزودن ذرات تقویت کننده به آلیاژ زمینه باعث ایجاد ناپیوستگی در لایه محافظ اکسیدی می‌شوند [۱۷] و این ناپیوستگی‌ها در لایه محافظ خود نقاط مستعدی برای شروع خوردگی موضعی و تخریب لایه محافظ می‌باشند. با افزایش میزان ذرات تقویت کننده در ساختار نانوکامپوزیت‌ها میزان این ناپیوستگی‌ها در لایه محافظ افزایش می‌یابد و بدین ترتیب مقاومت به خوردگی نانوکامپوزیت‌ها با افزایش ذرات تقویت کننده کاهش



شکل ۷: نقش ذرات SiC، ایجاد ناپیوستگی روی فیلم محافظ.

#### ۴- نتیجه گیری

- تصاویر میکروسکوپی ریزساختار نشان دهنده توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در فلز زمینه و مقدار کمی کلوخه‌ای شدن ذرات تقویت کننده را نشان می‌دهد و همچنین چگالی نمونه‌ها با افزایش میزان ذرات تقویت کننده کاهش یافته است.

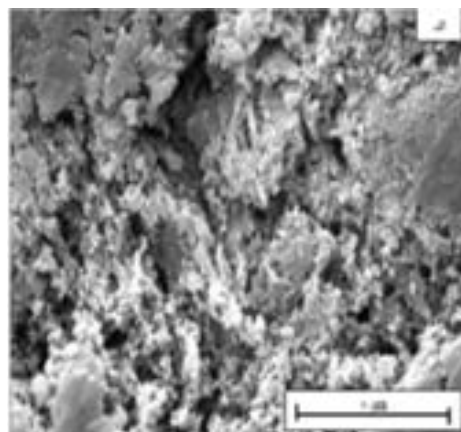
- سختی نمونه‌ها و استحکام کششی آن با افزایش میزان ذرات تقویت کننده افزایش یافته است اما در مقابل شاهد کاهش در پارامترهای شکل پذیری بوده‌ایم.

- با افزایش میزان ذرات تقویت کننده، مقاومت در برابر خوردگی نمونه‌ها کاهش یافته است و شکل اصلی خوردگی در نمونه‌ها خوردگی حفره‌ای بوده است.

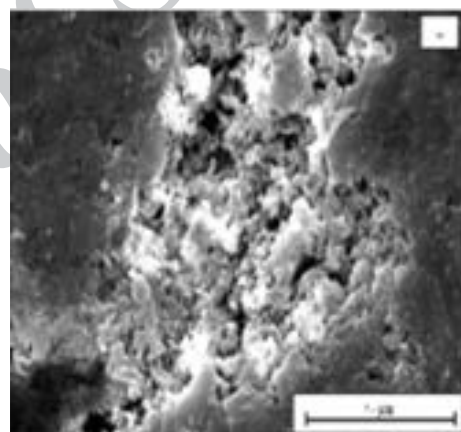
#### مراجع

- [1] N. Parvin, R. Asadifard, P. Safarzadeh, S. Sheibani, P. Marashi, *Material Science and Engineering*, **492**, 2008, 134.
- [2] M. Tavoosi, F. Karimzadeh, M.H. Enayati, *Materials Letters*, **62**, 2008, 282.
- [3] R.W. Revie, "Uhlig's Corrosion Handbook", John Wiley & Sons, New Jersey, 2011.
- [4] Y. Shimizu, T. Nishimura, I. Matsushima, *Materials Science and Engineering: A*, **198**, 1995, 113.
- [5] J. Hu, W.Y. Chu, W.D. Fei, L.C. Zhao, *Materials Science and Engineering*, **374**, 2004, 153.
- [6] S. Candan, *Materials Letters*, **58**, 2004, 3601.
- [7] Z. Ahmad, B.J. Abdul Aleem, *Materials & Design*, **23**, 2002, 173.
- [8] A.J. Trowsdale, B. Noble, S.J. Harris, I.S. Gibbins, G.E. Thompson, G.C. Wood, *Corrosion Science*, **38**, 1996, 177.
- [9] C. He, C.S. Liu, F. Li, Q. Cai, Z. Shi, L. Chen, J. Bi, *Journal of Materials Science and Technology*, **18**, 2002, 261.
- [10] T.S. Mahmoud, E.S. Yosef, A.S. Merzen, *Materials Research*, **15**, 2012, 903.
- [11] *Metallography and Microstructures*, ASM, 9, 1985.
- [12] M. Gavgali, B. Dikici, F. Bedri, *Indian Journal of Engineering and Material Science*, **14**, 2007, 303.
- [13] L. Lu, M. Lai, C.W. Ng, *Materials Science and Engineering A*, **252**, 1998, 203.
- [14] J. Safari, G.H. Akbari, A. Shahbazkhan, M.D. Chermahini, *Journal of Alloys and Compounds*, **509**, 2011, 9419.
- [15] B. Xiong, Z. Xu, Q. Yan, C. Cai, Y. Zheng, B. Lu, *Journal of Alloys and Compounds*, **497**, 2010, L1.

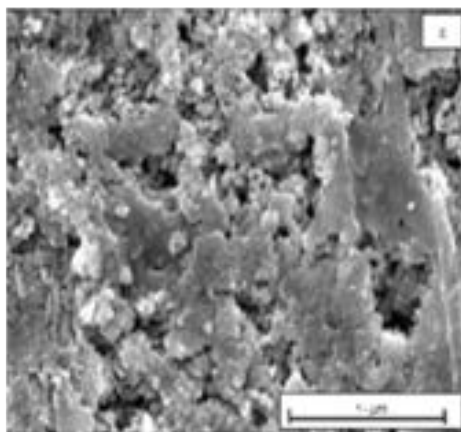
ناجایی در فصل مشترک زمینه/تقویت کننده می‌شود. این افزایش در میزان ناجایی، با افزایش ذرات تقویت کننده افزایش می‌یابد، که خود این مساله می‌تواند باعث کاهش مقاومت به خوردگی در نانوکامپوزیت‌ها گردد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح خورده شده نانوکامپوزیت‌ها، الف) Al-2%SiC، ب) Al-2.5%SiC و ج) Al-5%SiC.



[18] H. Abdoli, E. Saebnouri, S.K. Sadrnezhaad, M. Ghanbari, T. Shahrabi, *Journal of Alloys and Compound*, **490**, 2010, 624.  
[19] Z. Ahmad, P.T. Paulette, B.J. Aleem, *Journal of Materials Science*, **35**, 2000, 2573.

[16] S.F. Hassan, M. Gupta, *Journal of Alloys and Compounds*, **419**, 2006, 84.  
[17] I.B. Singh, D.P. Mandal, M. Singh, S. Das, *Corrosion Science*, **51**, 2009, 234.

Archive of SID