

تشکیل لایه اکسیدی نانوکامپوزیتی آندایز حاوی نانوپودر SiC بر روی آلومینیم

یاسین عبدالهی و علیرضا صبور روح اقدم

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد

(دریافت مقاله: ۹۱/۰۲/۰۵ - پذیرش مقاله: ۹۲/۱۰/۳۰)

چکیده

با استفاده از یک روش آندایز آلومینیم، فیلم نانوکامپوزیتی آندایز حاوی نانوپودر SiC (با ذرات حداکثر ۵۰ نانومتر) بر روی آلومینیم خالص تجاری (۹۹/۳۰٪ Al) تشکیل شد. میکروساختار و خواص فیلم اکسیدی بوسیله میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروآنالیز پراکنش اشعه X (EDX) بررسی شدند. به منظور ارزیابی خواص مکانیکی فیلم نانوکامپوزیتی، میکروسختی و تست سایش انجام شدند. نتایج نشان می‌دهند که فیلم‌های نانوکامپوزیتی حاوی نانوپودر SiC، افزایش میکروسختی و مقاومت به سایش دارند. غلظت بهینه نانوپودر اضافه شده به الکترولیت اندازه‌گیری شده در این تحقیق، برابر ۷ گرم بر لیتر است. در شرایط بهینه، میکروسختی ۶۱۶ نوپ، ضریب اصطکاک ۰/۵۳۴ و کاهش وزن ناشی از سایش ۰/۸۱ میلی‌گرم است، در حالی که نمونه بدون ذرات SiC دارای میکروسختی ۵۲۸ نوپ و ضریب اصطکاک ۰/۶۵۳ و کاهش وزن آن ۱/۵۳ میلی‌گرم است.

واژه‌های کلیدی: فیلم نانوکامپوزیتی آندایز، نانوپودر SiC، میکروسختی، مقاومت به سایش، آنالیز EDX.

Synthesis of anodizing nanocomposite oxide layers containing SiC nanopowder on Aluminum

Yasin Abdollahi and Alireza Sabour Rouhaghdam

Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University

(Received 24 April 2012, accepted 20 January 2014)

Abstract

With an anodizing method, anodized nanocomposite films containing SiC nanopowders (up to 50 nm), were formed on commercial pure Aluminum (99.30% Al). The microstructures and properties of the oxide films were studied by optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and Energy dispersive x-ray microanalysis (EDX). To evaluate the mechanical properties of the nanocomposite films, microhardness and wear resistance tests were performed. Results indicate that the nanocomposite films including SiC nanopowders have increased microhardness and wear resistance. The optimal amount of SiC nanopowders added to electrolyte, in this work, was 7 gr/lit. Under the optimal conditions, the microhardness is 616 knoop, the friction coefficient of 0.534 and the weight loss is 0.81 mg, while in the sample without SiC nanopowders: the microhardness is 528 knoop, the friction coefficient of 0.653 and the weight loss is 1.53 mg.

Key words: Anodizing nanocomposite film; SiC nanopowders; Microhardness; Wear resistance, EDX analysis

E-mail of corresponding author: abdollahi.m7@gmail.com

مقدمه

آندایزینگ فرآیندی است که باعث تقویت تمایل ذاتی فلزاتی نظیر آلومینیم برای اکسیداسیون خود به خودی می‌شود که باعث بهبود خواص سطحی نظیر خواص مکانیکی می‌شود [۱]. مقاومت به سایش و میکروسختی لایه اکسیدی با افزایش دانسیته جریان افزایش می‌یابد [۲]. ولی افزایش دانسیته جریان باعث بروز پدیده سوختن می‌شود [۳]. همچنین با کاهش دمای آندایزینگ میکروسختی و مقاومت به سایش لایه اکسیدی افزایش می‌یابد [۴]، ولی کاهش دما با محدودیت امکانات همراه است. بنابراین از روش‌های دیگری برای بهبود خواص مکانیکی لایه اکسیدی استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر آلیاژهای آلومینیم که دارای پوشش فیلم‌های کامپوزیتی سطحی هستند و دارای مقاومت به سایش خوبی هستند و خاصیت خود روغن کاری دارند، برای کاربردهای خاصی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵ و ۶]. روش سنتی و معمول تولید فیلم‌های کامپوزیتی به این صورت است که ابتدا به منظور ساخت فیلم متخلخل بر روی سطح آلومینیم آندایزینگ سخت انجام می‌گیرد و در ادامه منغذهای فیلم یا به صورت سیل کردن با مواد جامد روانساز (مانند پلی تترافلوئورو اتیلن^۱ (PTFE)) و یا بوسیله پوشش‌دهی سطحی به منظور افزایش سختی فیلم اکسیدی استفاده می‌شود [۷]. زو^۲ و همکارانش پوشش‌هایی را تولید کردند که در آن ذرات فلئورپلیمر^۳ به یکی از روش‌های فرآیند غوطه‌وری گرم^۴ یا فرآیند رسوب‌نشانی الکتروفوریتیک^۵ در میکرومنغذهای فیلم اکسید آلومینیم اضافه شده است و در نهایت عملیات حرارتی در خلأ انجام می‌دهند. لیو^۶ و همکارانش به صورت موفقیت آمیزی توانستند پوشش‌های آندایز سخت حاوی میکروذرات PTFE را با

اضافه کردن PTFE به الکترولیت آندایز سخت متداول بر روی سطح آلیاژ آلومینیم ۶۰۶۳ ایجاد کنند. به منظور بررسی مکانیزم کامپوزیت‌های آندی حاوی پودرها، کوانگ^۷ و همکارانش فرآیند اکسیداسیون آندی ولتاژ بالا را در یک الکترولیت اسیدی حاوی کسرهای مختلفی از امولوسیون PTFE بررسی کردند. مشکلی که وجود دارد این است که اکثر این مواد روانساز نرم هستند، بنابراین کامپوزیت‌های اکسیدی آندی شامل چنین موادی نمی‌توانند به سختی بالایی برسند [۸].

در سال‌های اخیر، تولید فیلم‌های کامپوزیتی با اضافه کردن ذرات تقویت کننده در الکترولیت به صورت وسیعی بررسی شده است [۹]. زنگ^۸ و همکارانش رفتار آندایزینگ کامپوزیت‌های آلومینیم شامل پودرهای SiC، TiO₂ و Al₂O₃ در الکترولیت اسید سولفوریک را بررسی کردند. آنها پی بردند که پودرها به شدت ضخامت، سختی و مقاومت به خوردگی فیلم آندایز شده را بهبود می‌بخشند [۸].

در این تحقیق تاثیر غلظت نانوپودر SiC بر روی خواص مکانیکی فیلم کامپوزیتی Al₂O₃-SiC بررسی می‌شود. به نظر می‌رسد با افزودن ذرات نانوپودر SiC که نسبت به Al₂O₃ سختی بالاتری دارند به الکترولیت و آندایز آلومینیم در آن شرایط، با تشکیل فیلم نانوکامپوزیتی Al₂O₃-SiC هم سختی و هم مقاومت به سایش سطح بهبود می‌یابد. در طول فرآیند آندایز لایه سدی در فصل مشترک لایه اکسیدی-الکترولیت تشکیل شده و در ادامه فیلم اکسیدی بر روی لایه سدی رشد می‌کند. فیلم در اثر مهاجرت یون‌های O²⁻ یا OH⁻ به سمت فصل مشترک آلومینیم زیرلایه و فیلم اکسیدی و مهاجرت یون‌های Al³⁺ به فصل مشترک فیلم اکسیدی-الکترولیت تشکیل می‌شود [۱۰]. مکانیزم فیلم اکسید نانوکامپوزیتی حاوی نانوذرات SiC به این صورت است که با استفاده از سورفکتانت آنیونی SDS سطح نانوپودر فعال می‌شود. در

¹ polytetrafluoroethylene

² Zou

³ fluoropolymer

⁴ hot-dipping process

⁵ Electrophoretic deposition process

⁶ Liu

⁷ Kuang

⁸ Zeng

اکسیدی نمونه‌ها طبق استاندارد ۹۹-۳۸۴ E بر حسب نوپ^۲ اندازه‌گیری شد. برای میکروسختی‌سنجی از بار ۵۰ گرم به مدت زمان ۱۵ ثانیه استفاده شد. و برای اندازه‌گیری مقاومت به سایش لایه اکسیدی طبق استاندارد ۹۵a-۹۹ G، از روش گوی و میدان با گوی‌های اکسید آلومینیم با استفاده از بار ۴۰ نیوتن در ۱۰۰۰۰ دور روی نمونه با قطر ۱/۵ سانتی‌متر و با سرعت ۷۵ دور بر دقیقه استفاده شد و نتایج با هم مقایسه شدند.

جدول ۱. شرایط آزمایش به منظور بدست آوردن غلظت بهینه نانوپودر SiC اضافه شده به الکترولیت.

| پارامتر | مقدار |
|-------------------------------------|---|
| دما | صفر درجه سانتی‌گراد |
| زمان | ۹۰ دقیقه |
| دانسیته جریان | ۳ آمپر بر دسی‌متر مربع |
| ترکیب الکترولیت | ۱۶۰ گرم بر لیتر اسید سولفوریک + ۱۲ گرم بر لیتر اسید اگزالیک |
| نانوپودر SiC اضافه شده به الکترولیت | ۰-۷ گرم بر لیتر |
| SDS اضافه شده به الکترولیت | با نسبت ۱ به ۲۰ نانوپودر اضافه شده |

نتایج و بحث

میکروساختار

در شکل ۱ تصویری از سطح مقطع لایه اکسیدی نانوکامپوزیتی Al₂O₃-SiC دیده می‌شود. همانطور که دیده می‌شود ذره‌ای با اندازه ۳۸ نانومتر (در حدود اندازه ذرات پودر SiC) در تصویر وجود دارد که آنالیز EDS آن در شکل ۲ آمده شده است ولی از آنجایی که طبق رابطه عمق نفوذ کانایا-اکایا^۳ [۱۲] عمق نفوذ برای آلومینیم با انرژی حدود ۲۰ kV بالای ۴ میکرون است.

نتیجه سطح ذرات دارای بار منفی خواهد شد. وقتی که سطح دارای توزیع خوبی از ذرات با بار منفی باشد، در اثر نیروی میدان الکتریکی و هم‌زدن، ذرات دارای بار منفی در الکترولیت می‌توانند به سطح فیلم (یا آند) برسند. به صورت هم‌زمان، از آنجایی که فیلم متخلخل جذب سطحی بالایی دارد، نانوذرات SiC می‌توانند با استفاده از روش‌هایی مانند درگیری مکانیکی، جذب و برهمکنش در داخل فیلم باقی بمانند [۸].

مواد و روش تحقیق

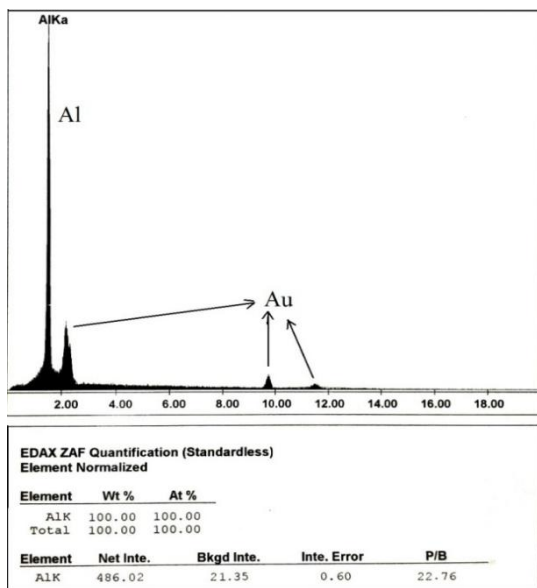
آلومینیم مورد استفاده آلومینیم خالص تجاری (آلومینیم AA ۱۲۳۰) است. و نانوپودر SiC استفاده شده با میانگین اندازه دانه کمتر از ۵۰ نانومتر و خلوص ۹۹/۰ درصد بود. از آنجایی که پودر کاربید سیلیسیم خود خستی است باید با استفاده از سورفکتانت باردار شوند تا در اثر نیروی میدان الکتریکی جذب سطح شوند، نوع و مقدار سورفکتانت بر مقدار پودر شرکت کننده در تشکیل پوشش کامپوزیتی موثر است [۱۱] و از آنجایی که نمونه آند واقع می‌شود، باید پودر دارای بار منفی شود، به همین خاطر از سورفکتانت آنیونی استفاده می‌شود که در این پژوهش سورفکتانت^۱ SDS استفاده شد.

نمونه‌ها ابتدا با کاغذ سنباده‌های تا ۱۵۰۰ سنباده زده شدند. سپس نمونه‌ها در محلول هیدروکسید سدیم ۱۰۰ گرم بر لیتر با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک دقیقه اچ شدند و در ادامه بعد از آب‌شویی به مدت ۲ دقیقه در محلول ۳۰ درصد حجمی اسید نیتریک با دمای محیط غوطه‌ور شدند و سپس فرآیند آندایزینگ انجام شد که شرایط آندایزینگ در جدول ۱ آمده است. در طول فرآیند آندایزینگ با استفاده از هم‌زن مکانیکی مانع از ته‌نشین شدن ذرات نانوپودر شده و همچنین باعث رساندن ذرات نانوپودر به سطح آند می‌شود. در ادامه بعد از فرآیند آندایزینگ، درصد SiC موجود در پوشش‌ها با استفاده از آنالیز EDX بررسی شد، میکروسختی لایه

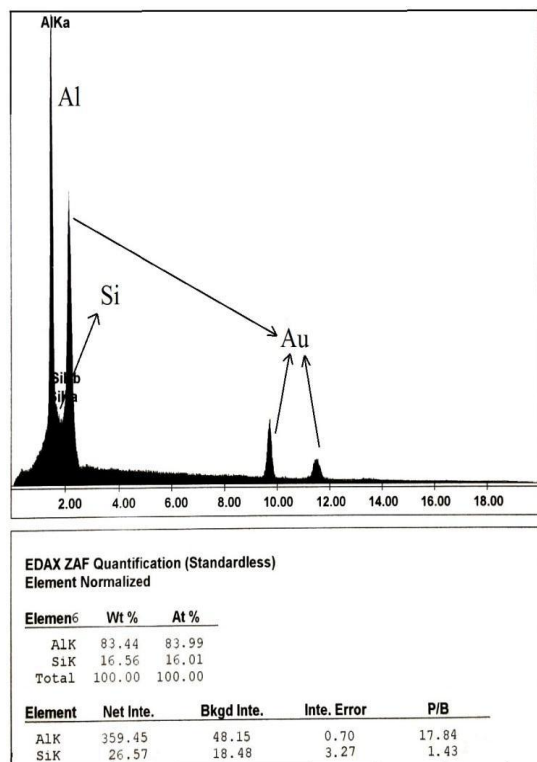
^۲ knoop

^۳ Kanaya-Okayama Depth Penetration Formula

^۱ Sodium Dodecyl Sulphate



شکل ۲. آنالیز عنصری نقطه مشخص شده در عکس ۲ (با استفاده از EDX).



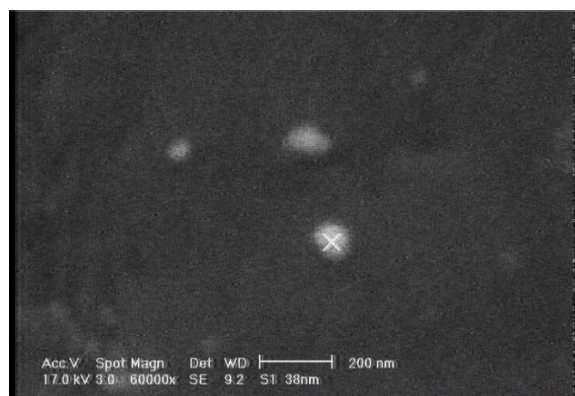
شکل ۳. آنالیز ناحیه‌ای از سطح پوشش نانوکامپوزیتی Al₂O₃-SiC با استفاده از EDX.

تاثیر غلظت نانوپودر SiC

به منظور بررسی تاثیر غلظت نانوپودر SiC اضافه شده به الکترولیت بر روی خواص لایه اکسیدی نانوکامپوزیتی آندایز شده آزمایش‌هایی انجام شده که نتایج مربوط به

$$R = \frac{(0.0276 A E^{1.67})}{(Z^{0.89} \rho)} \quad (1)$$

که R عمق نفوذ، A وزن اتمی، E انرژی موج، Z عدد اتمی و ρ دانسیته است. بنابراین آنالیز مربوط به عمق بیشتری از سطح است. بنابراین برای آنالیز ذراتی با این ابعاد نیاز به روش‌های پیشرفته‌تر نظیر الکترون اوزه است، ولی از آنجایی که درصد Si نشان داده شده صفر است، به نظر نمی‌رسد که این ذره SiC باشد. البته آنالیز EDX ناحیه‌ای از سطح نمونه‌ها (ناحیه‌ای به مساحت ۱۰۰ × ۱۰۰ میکرومتر) که در شکل ۳ آمده است نشان دهنده وجود درصد بالایی از Si (حدود ۱۶/۶ درصد) در پوشش است. از آنجایی که تنها منبع سیلیسیم موجود در لایه اکسیدی نانوپودر کاربید سیلیسیم (SiC) اضافه شده به الکترولیت است و همچنین ذرات SiC نمی‌توانند با اجزاء موجود در محیط واکنش دهند در نتیجه به نظر می‌رسد که تمامی Si موجود در پوشش مربوط به نانوپودر SiC است ولی در عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات SiC از زمینه Al₂O₃ قابل تفکیک نیستند. همچنین همانطور که در شکل ۳ مربوط به آنالیز EDX دیده می‌شود با وجود درصد بالای Si در پوشش (۱۶/۶٪ وزنی) از آنجایی که پیک Si بسیار نزدیک به پیک Al است، پیک‌ها بسیار به هم نزدیک هستند و پیک Si تقریباً زیر پیک Al قرار می‌گیرد.



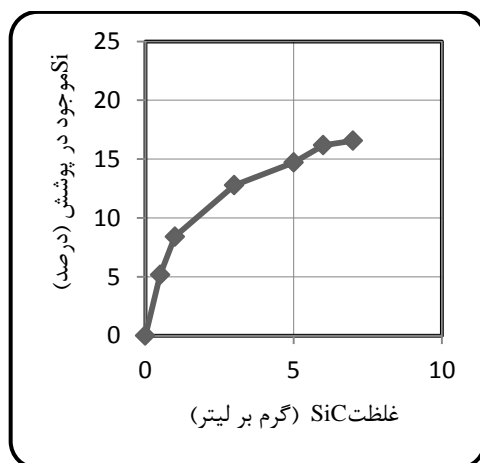
شکل ۱. عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع لایه نانوکامپوزیتی Al₂O₃-SiC با بزرگنمایی ۶۰۰۰۰.

ضخامت، میکروسختی و مقاومت به سایش این آزمایش‌ها در جدول ۲ ذکر شده است. در این آزمایش‌ها از نسبت

جدول ۲. نتایج مربوط به تاثیر غلظت نانوپودر SiC اضافه شده به محلول الکترولیت ۱۶۰ گرم بر لیتر اسید سولفوریک + ۱۲ گرم بر لیتر اسید اگزالیک بر خواص لایه اکسیدی آلومینیم آندایز شده به مدت ۹۰ دقیقه با دانسیته جریان ۳ آمپر بر دسی متر مربع در دمای صفر.

| غلظت SiC (g/l) | غلظت SDS (mg/l) | ضخامت (μm) | درصد Si پوشش | کاهش وزن (mg) | ضریب اصطکاک | سختی (نوب) |
|----------------|-----------------|------------|--------------|---------------|-------------|------------|
| صفر | صفر | ۸۷/۲ | ~ صفر | ۱/۵۳ | ۰/۶۵۳ | ۵۲۸ |
| ۰/۵ | ۲۵ | ۸۹/۲ | ۵/۲ | ۱/۳۶ | ۰/۶۰۸ | ۵۴۳ |
| ۱ | ۵۰ | ۹۱/۲ | ۸/۴ | ۱/۲۳ | ۰/۵۸۲ | ۵۵۰ |
| ۳ | ۱۵۰ | ۸۹/۸ | ۱۲/۸ | ۱/۰۵ | ۰/۵۶۱ | ۵۸۳ |
| ۵ | ۲۵۰ | ۹۰/۹ | ۱۴/۷ | ۰/۹۳ | ۰/۵۵۱ | ۶۰۲ |
| ۶ | ۳۰۰ | ۹۲/۳ | ۱۶/۲ | ۰/۸۵ | ۰/۵۳۷ | ۶۱۱ |
| ۷ | ۳۵۰ | ۹۳/۱ | ۱۶/۶ | ۰/۸۱ | ۰/۵۳۴ | ۶۱۶ |

گفت مقدار Si موجود در لایه نشان دهنده مقدار نانوپودر SiC در لایه اکسیدی است. بنابراین غلظت نانوپودر موجود در لایه نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۴. تاثیر غلظت پودر SiC اضافه شده به الکترولیت بر روی درصد Si موجود در لایه اکسیدی نانوکامپوزیتی.

همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود منحنی مربوطه تقریباً به شکل سهمی است یعنی با افزایش غلظت نانوپودر SiC در الکترولیت شیب افزایش درصد Si به تدریج کاهش می‌یابد و به یک حد ثابت می‌رسد. چون مقدار ذرات پودر نانو SiC که می‌توانند در لایه اکسیدی به دام

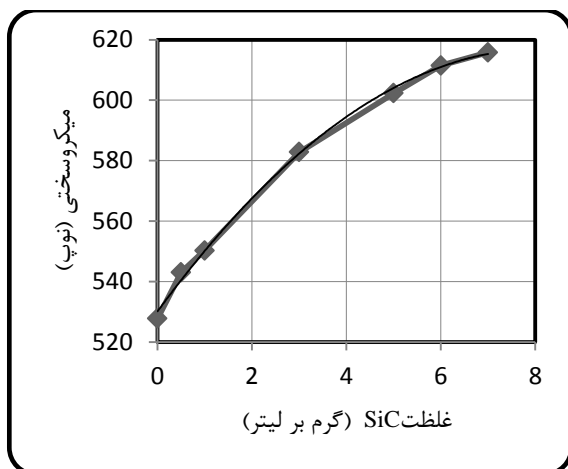
در شکل ۴ منحنی درصد سیلیسیم موجود در لایه اکسیدی نسبت به مقدار نانوپودر SiC اضافه شده به الکترولیت نشان داده شده است، که مقدار Si با استفاده از آنالیز EDX ناحیه‌ای از سطح نمونه گرفته شده است، در نمونه‌ای که بدون اضافه کردن نانوپودر SiC آندایز شده است درصد Si تقریباً صفر است، البته درصد Si موجود در خود فلز پایه ۰/۰۹ درصد است و از آنجایی که مقدار بسیار جزئی است در آنالیز EDX مشاهده نشد.

با افزایش غلظت نانوپودر SiC از ۰/۵ گرم بر لیتر تا ۷ گرم بر لیتر درصد Si موجود در پوشش از ۵/۲ درصد تا ۱۶/۶ درصد افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر حدود ۲۲۰٪ افزایش می‌یابد که به این علت می‌باشد که با افزایش نانوپودر موجود در لایه اکسیدی، ذرات SiC که می‌توانند به سطح نمونه برسند و در داخل لایه اکسیدی حبس شوند افزایش می‌یابد و بنابراین درصد Si افزایش می‌یابد و همانطور که در بخش قبلی گفته شد از آنجایی که تنها منبع Si موجود در لایه ذرات نانو پودر SiC هستند.

(Si) فلز پایه ۰/۰۹ درصد است که مقداری بسیار ناچیز و قابل صرف نظر است) و به نظر نمی‌رسد که واکنشی بین ذرات پودری و اجزا محیط اتفاق بیافتد، بنابراین می‌توان

تاثیر غلظت نانوپودر SiC موجود در الکترولیت بر سختی لایه اکسیدی

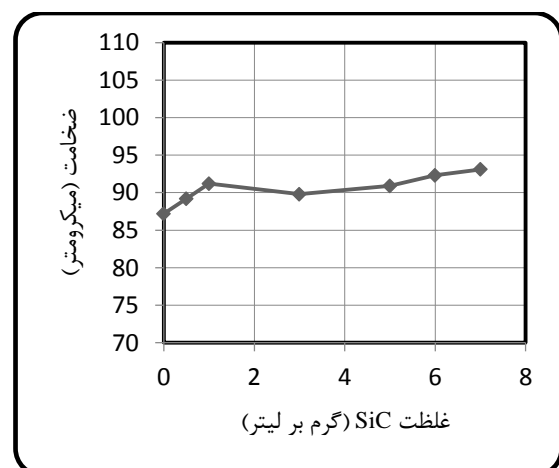
در شکل ۶ منحنی سختی لایه اکسیدی بر حسب غلظت SiC اضافه شده به الکترولیت نشان داده شده است، همانطور که دیده می‌شود، با افزودن SiC به فاز زمینه Al_2O_3 و تشکیل لایه نانوکامپوزیتی Al_2O_3 -SiC سختی لایه اکسیدی افزایش می‌یابد [۱۳ و ۱۴]. با افزایش غلظت پودر سختی افزایش می‌یابد. با توجه به افزایش درصد Si و به تبع آن افزایش درصد نانوپودر SiC در فاز زمینه قابل توجه است. چون سختی SiC نسبت به Al_2O_3 بیشتر است (سختی SiC خالص ۲۷۰۰ نوپ و سختی Al_2O_3 خالص حدود ۲۰۰۰ نوپ است [۱۵]) و معمولا افزودن یک فاز سخت به یک زمینه نرمتر باعث بهبود سختی می‌شود. میکروسختی لایه اکسیدی عاری از ذرات نانوپودر SiC برابر ۵۲۸ نوپ است و همانطور در شکل ۷ دیده می‌شود با افزایش غلظت نانوپودر SiC موجود در الکترولیت از صفر تا ۷ گرم بر لیتر میکروسختی لایه اکسیدی به صورت سهمی مانند از ۵۲۸ تا ۶۱۶ نوپ افزایش می‌یابد. که این افزایش سختی و همچنین حالت سهمی مانند افزایش سختی مطابق با درصد پودر موجود در لایه اکسیدی است.



شکل ۶. تاثیر غلظت پودر SiC اضافه شده به الکترولیت بر روی میکروسختی لایه اکسیدی نانوکامپوزیتی آندایز شده.

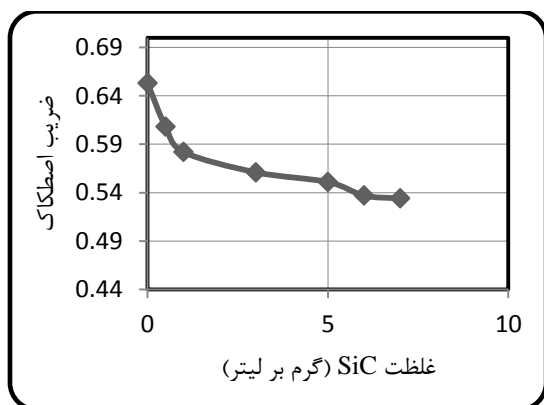
بیافتند به حد اشباع نزدیک می‌شود، همانطور که دیده می‌شود با افزایش غلظت نانوپودر از ۶ گرم بر لیتر تا ۷ گرم بر لیتر درصد Si به مقدار جزئی و از ۱۶/۲ تا ۱۶/۶ درصد افزایش می‌یابد و به نظر می‌رسد که افزایش بیشتر مقدار پودر تاثیری بر افزایش درصد Si موجود در لایه اکسیدی نخواهد گذاشت.

در شکل ۵ منحنی ضخامت لایه اکسیدی به ازای غلظت‌های متفاوت نانوپودر SiC آورده شده است، همانطور که دیده می‌شود و در جدول ۲ هم مقادیر آن ذکر شده است ضخامت تقریبا ثابت است هرچند به نظر می‌رسد که با افزایش غلظت پودر، افزایش بسیار جزئی در ضخامت خواهیم داشت، همانطور هم که دیده می‌شود شیب منحنی افزایش ضخامت تقریبا ناچیز است، این افزایش جزئی می‌تواند به دلیل وجود ذرات SiC باشد که علاوه بر اینکه منفذها و عیوب را پر کرده تا حدودی ضخامت را افزایش دهد، در نهایت می‌توان گفت که ضخامت بیشتر وابسته به پارامترهایی نظیر دما، زمان، دانسیته جریان و ترکیب الکترولیت است که در اینجا ثابت در نظر گرفته شده‌اند و وابستگی کمی به درصد نانوپودر اضافه شده به الکترولیت دارد.

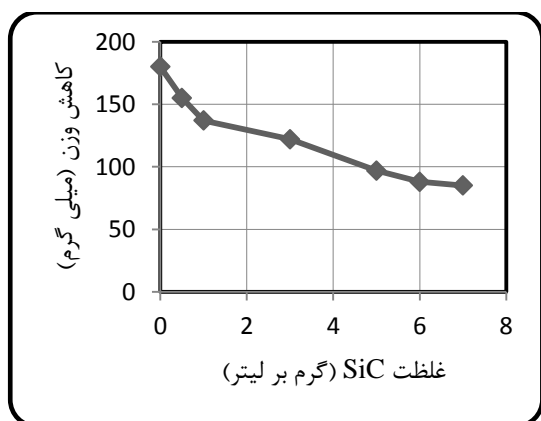


شکل ۵. تاثیر غلظت پودر SiC اضافه شده به الکترولیت بر روی ضخامت لایه اکسیدی نانوکامپوزیتی.

نانوپودر SiC است که در قسمت تاثیر غلظت سورفکتانت بر مقاومت به سایش لایه اکسیدی توضیح داده شد. افت شدید کاهش وزن را می‌توان این گونه تفسیر کرد که هم ضریب اصطکاک کاهش یافته است و هم اینکه ذرات سخت SiC، سخت‌تر ساییده می‌شوند بنابراین کاهش وزن بسیار کمتری خواهند داشت. بنابراین با افزودن نانوپودر SiC به پوشش و تشکیل لایه نانوکامپوزیتی Al_2O_3 -SiC مقاومت به سایش لایه اکسیدی افزایش می‌یابد [۱۶].



شکل ۷. تاثیر غلظت نانوپودر SiC بر روی ضریب اصطکاک لایه اکسیدی نانوکامپوزیتی.



شکل ۸. تاثیر غلظت نانوپودر SiC بر روی کاهش وزن در اثر سایش لایه اکسیدی نانوکامپوزیتی.

در غلظت ۷ گرم بر لیتر نانوپودر SiC مقدار سختی تقریباً به یک مقدار ثابت می‌رسد، چون درصد نانوپودر SiC موجود در لایه اکسیدی به حد اشباع می‌رسد. با افزودن ۷ گرم بر لیتر SiC به الکترولیت سختی لایه اکسیدی حدود ۸۸ نوپ (حدود ۱۷ درصد) نسبت به حالتی که هیچ ذره‌ای افزوده نشده است، افزایش می‌یابد. در پژوهشی که چن و همکارانش [۸] در سال ۲۰۱۰ به منظور تهیه لایه اکسیدی کامپوزیتی حاوی ذرات Al_2O_3 با استفاده از افزودن ذرات Al_2O_3 با اندازه ذره زیر ۵۰۰ نانومتر به الکترولیت انجام دادند، حد اشباع پودر اضافه شده ۶ گرم بر لیتر بود، هرچند در کار تحقیقاتی آنها افزایش سختی حدود ۱۰٪ بود ولی در این پژوهش افزایش سختی بیشتر است، که می‌توان گفت هم ذرات SiC نسبت به Al_2O_3 سختی بالاتری دارند و هم اینکه اندازه ریزتر ذرات اضافه شده SiC باعث چگال‌تر شدن لایه اکسیدی و سختی بالاتر می‌شود.

تاثیر غلظت نانوپودر SiC موجود در الکترولیت بر مقاومت به سایش لایه اکسیدی

در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب تاثیر غلظت نانوپودر SiC بر ضریب اصطکاک لایه اکسیدی و کاهش وزن ناشی از سایش لایه اکسیدی دیده می‌شود که مشابه تاثیر غلظت نانوپودر SiC بر میکروسختی لایه اکسیدی بوده و رابطه مستقیمی با درصد Si موجود در لایه اکسیدی دارد و در هردو مورد یک حالت سهمی مانند دارد. به ازای افزودن صفر تا ۷ گرم بر لیتر نانوپودر SiC به الکترولیت ضریب اصطکاک به صورت سهمی مانند از ۰/۶۵۳ تا ۰/۵۳۴ کاهش می‌یابد (به عبارت دیگر حدود ۲۳٪ کاهش ضریب اصطکاک خواهیم داشت).

همچنین همانطور که در شکل ۸ دیده می‌شود، کاهش وزن ناشی از سایش از ۱/۵۳ تا ۰/۸۱ میلی گرم کاهش می‌یابد (به عبارت دیگر بیش از ۸۸٪ کاهش وزن ناشی از سایش افت می‌کند) که نشان دهنده افزایش مقاومت به سایش لایه اکسیدی است که به علت وجود ذرات

manufacture, United States US Pat. 5325732 (1994).

8. S. Chen, Ch. Kang, J. Wang, Ch. Liu, K. Sun, *Synthesis of anodizing composite films containing superfine Al₂O₃ and PTFE particles on Al alloys*, Applied Surface Science, 256(2010) 6518-6525.
9. W.J. Zhang, D. Zhang, Y.K. Le, L. Li, B. Qu, *Fabrication of surface self-lubricating composites of aluminum alloy*, Applied Surface Science, 255(2008) 2671-2674.
10. K. Shimizu, K. Kobayashi, G.E. Thompson, *Development of porous anodic films on aluminum*, Philosophical Magazine, 66(1992) 643-646.
11. C.F. Malfatti, H.M. Veit, T.L. Menezes, J. Zoppas Ferreira, J.S. Rodriguês, J. P. Bonino, *The surfactant addition effect in the elaboration of electrodeposited NiP-SiC composite coatings*, Surface & Coatings Technology, 201(2007) 6318-6324.
12. K. Kanaya, S. Okayama, *Penetration and energy-loss theory of electrons in solid targets*, Journal of Physics D Applied Physics, 5(1972) 43-58.
13. KO. Y. Moko, W. Kwon, Y. Kim, *development of Al₂O₃-SiC composite tool for machining application*, ceramics International, 30(2004) 2081-2086.
14. C.H. XU, Y.M. FENGA, R.B. ZHANGA, S.K. ZHAOA, X. XIAOA, *Wear behavior of Al₂O₃/Ti(C,N)/SiC new ceramic tool material when machining tool steel and cast iron*, Journal of Materials Processing Technology, 209(2009) 4633-4637.
15. D. W. Richardson, *Modern Ceramic Engineering: properties, processing and use in design*; Third Edition, M Dekker; New York, N Y, 29(2005).
16. J. Sedlacek, D. Galusek, P. Svancarek, X. wang, *Abrasive wear of Al₂O₃-SiC and Al₂O₃-(SiC)-C composites with micrometer- and submicrometer-sized alumina matrix grains*, Journal of the European Ceramic Society, 28(2008) 2983-2993.

نتیجه گیری

افزودن نانوپودر SiC به الکترولیت در آندایزینگ باعث:

- افزایش سختی لایه اکسیدی به میزان ۱۷٪
- کاهش ضریب اصطکاک به میزان ۲۳٪
- همچنین کاهش وزن ناشی از سایش لایه اکسیدی تا بیش از ۸۸٪ می شود ولی در غلظت معینی به حد اشباع می رسد که غلظت بهینه بدست آمده در این پژوهش ۷ گرم بر لیتر است.

مراجع

1. R. LeBlanc, *The Effect of Anodizing to Minimize Friction and Wear of Aluminum Surfaces*, Rensselaer Polytechnic Institute MANE-6960 Friction and Wear of Materials, 2009.
2. J. A. Wahab, D. M. Nazree, A. H. Iqwan, *Influence of Anodizing Voltage on Formation of Porous Anodic Aluminium Oxide Thin Films in Mixed Solution of H₃PO₄ and CH₃COOH*, Universiti Malaysia Perlis, MMC 09 (2009) 1-6.
3. W. Bensalah, M. Feki, M. Wery, H.F. yedi, *Thick and Dense Anodic Oxide Layers Formed on Aluminum in Sulphuric Acid Bath*, Journal of Materials Science & Technology, 26(2010) 113-118.
4. T. Aerts, Th. Dimogerontakis, I. De Graeve, J. Fransaeer, H. Terryn, *Influence of the anodizing temperature on the porosity and the mechanical properties of the porous anodic oxide film*, Surface and Coatings Technology, 201(2007) 7310-7317.
5. Y.C. Zhao, M. Chen, W.M. Liu, X. Liu, Q.J. Xue, *Preparation and self-lubrication treatment of ordered porous anodic alumina film*, Mater Chem Phys, 82(2003) 3-374.
6. M. Takaya, K. Hashimoto, Y. Toda, M. Maejima, *Novel tribological properties of anodic oxide coating of aluminum impregnated with iodine compound*, Surf Coat. Technol. 169/170 (2003) 160-162.
7. F.L. Vogel, *Motion transmitting combination comprising castable selflubricating composite and methods of*