

بررسی تأثیر ضخامت بر خواص لایه‌های نازک تیتانیم ایجاد شده توسط فرآیند پراکنش مگنترونی DC

علی امیر عبداللهیان^۱ و عبدالله افشار^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد خوردگی و حفاظت مواد، دانشکده مهندسی مواد،

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

amirabdollahian_ali@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۳۱)

چکیده

هدف از تحقیق حاضر بررسی تأثیر افزایش ضخامت بر خواص لایه‌های نازک تیتانیم ایجاد شده روی زیرلایه فولاد زنگ نزن AISI 316L با استفاده از فرآیند پراکنش مگنترونی DC است. به این منظور، عملیات رسوب‌دهی در مدت زمان‌های مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه انجام شد تا لایه‌هایی با ضخامت‌های مختلف ایجاد شود. سپس ضخامت لایه‌های نازک تیتانیم با استفاده از دستگاه پروفیل‌سنج اندازه‌گیری شد. همچنین مورفولوژی لایه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) بررسی و اندازه میانگین نانوذرات تیتانیم تعیین شد. توپوگرافی لایه‌های نازک تیتانیم نیز با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) بررسی و مقدار زبری میانگین سطح لایه‌ها تعیین شد. به علاوه مقاومت به خوردگی ضخیم‌ترین لایه نازک تیتانیم ایجاد شده توسط آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک در محلول فیزیولوژیک SBF در دمای ۳۷°C مورد ارزیابی قرار گرفت و مقادیر پتانسیل خوردگی و دانسیته جریان خوردگی آن تعیین شد. نتایج حاصل از این آزمون‌ها نشان داد که لایه نازک تیتانیم با ضخامت ۲۹۸ nm از تراکم‌ترین و یکنواخت‌ترین ساختار برخوردار بوده و دارای بیشترین مقادیر اندازه میانگین نانوذرات تیتانیم (۶۵ nm) و زبری میانگین سطح (۳/۷۶۷ nm) است. همچنین ایجاد لایه نازک تیتانیم با ضخامت ۲۹۸ nm روی فولاد زنگ نزن AISI 316L باعث افزایش پتانسیل خوردگی آن از ۰/۳۱۳- به ۰/۲۷۹- و کاهش دانسیته جریان خوردگی از ۴۵۱/۱ به ۱۶۳/۴ nA/cm² می‌شود که در نتیجه مقاومت به خوردگی آن بهبود می‌یابد.

واژه‌های کلیدی:

فولاد زنگ نزن AISI 316L، لایه‌های نازک تیتانیم، پراکنش مگنترونی DC، ضخامت، مقاومت به خوردگی.

۱- مقدمه

توده یا پوشش در بیومواد، صنایع هوایی، شیمیایی و دیگر کاربردهای صنعتی است [۱ و ۳]. همچنین لایه‌های نازک تیتانیم برای کاربردهای میکروالکترونیکی در تکنولوژی تجمع در مقیاس بسیار زیاد^۱ (VLSI) و ابزارهای پایه‌ای سیستم

تیتانیم به خاطر خواص جالبش مانند نسبت استحکام به وزن بالا، پایداری حرارتی عالی، مقاومت به خوردگی در شرایط حاد و زیست سازگاری ذاتی، یک کاندید بالقوه برای استفاده به عنوان

تحقیقات انجام شده در زمینه بیومواد در محیط بافت طبیعی نشان می‌دهد که در فصول مشترک استخوان/بیومواد، زیست سازگاری ماده عامل تعیین کننده موفقیت ماده کاشتنی^۵، هم در قبول آن توسط ارگانسیم و هم در عملکرد مناسب آن است [۲]. پس بیومواد باید از یک سو خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مناسب را تأمین کرده و از سوی دیگر زیست سازگار باشند [۷].

بنابراین به منظور بهره‌برداری از خواص سطحی تیتانیم (مقاومت به خوردگی و زیست سازگاری) در حین حفظ خواص مغزی فولاد زنگ نزن (استحکام و سختی) و کاهش قیمت ماده کاشتنی، ایجاد لایه نازک تیتانیم با ضخامت مناسب روی فولاد زنگ نزن AISI 316L توصیه شده است [۲، ۷ و ۸]. در این تحقیق عملیات رسوب‌دهی لایه‌های نازک تیتانیم در مدت زمان‌های مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه انجام شد و تأثیر ضخامت بر خواص لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از ورق فولاد زنگ نزن AISI 316L با ضخامت ۱mm به عنوان زیرلایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی این آلیاژ با استفاده از آزمون کوانتومتری تعیین و در جدول (۱) آورده شده است.

نمونه‌ها توسط دستگاه برش در ابعاد $20 \times 10 \text{ mm}^2$ بریده شدند و سپس عملیات سنباده‌زنی با ورق‌های حاوی ذرات SiC انجام شد تا سطوحی کاملاً صاف و بدون شیار بدست آید. پس از عملیات سنباده‌زنی، نمونه‌ها در محلول استن خالص به مدت ۱۵ دقیقه با استفاده از یک دستگاه آلتراسونیک Struers مدل Metason 60 T چربی‌گیری شدند. سپس با آب دو بار تقطیر کاملاً شسته شده تا هیچ اثری از محلول چربی‌گیری روی نمونه‌ها باقی نماند. پس از عملیات شستشو، نمونه‌ها تحت جریان هوای گرم، خشک شده و بلافاصله در یک دسیکاتور قرار داده شدند.

میکروالکترومکانیکی^۲ (MEMS) به خدمت گرفته می‌شوند. به علاوه آنها به عنوان بولومتر^۳ در حسگرهای مادون قرمز، اتصال دهنده‌های الکتریکی در ساختارهای عایق حرارتی، حسگرهای لبه‌ای ابر رسانا در میکروکالری‌سنج و آشکارسازهای نوری و در ترانزیستورهای تک الکترونی^۴ استفاده می‌شوند [۱]. لایه‌های نازک تیتانیم برای ساخت ابزارهای نیمه رسانا نیز به طور وسیعی به کار برده می‌شوند [۴].

فرآیندهای رسوب‌دهی فیزیکی بخار به خصوص پراکنش به طور گسترده‌ای برای تهیه لایه‌های نازک تیتانیم استفاده می‌شوند [۱]. در پراکنش مرسوم (دوقطبی) هدف پراکنش توسط یون‌های شتاب گرفته از یک تخلیه گاز، بمباران می‌شود و ذرات پراکنش شده روی زیرلایه رسوب داده شده و یک پوشش ایجاد می‌شود. درحالی‌که پراکنش مگنترونی یک فرآیند پراکنش تقویت شده توسط میدان مغناطیسی است که میزان یونیزاسیون گاز توسط مسیر الکترونی مارپیچی به شدت بهبود می‌یابد. توسط میدان مغناطیسی، تخلیه تابشی به یک ناحیه نزدیک هدف محدود می‌شود که بازدهی پراکنش را در حدود ۱۰۰ برابر نسبت به پراکنش مرسوم افزایش می‌دهد. همچنین اجازه عملکرد سیستم در فشارهای پایین را نیز می‌دهد. ایجاد پوشش‌ها توسط پراکنش مگنترونی، برخی مزایای خاص دیگر مانند تجهیزات با قیمت پایین، سرعت‌های رسوب‌دهی بالا، پوشش‌هایی با دانسیته بالا و چسبندگی خوب بین پوشش و زیرلایه را فراتر از فرآیندهای دیگر ارائه می‌دهد [۵].

لایه‌های نازک تیتانیم ایجاد شده در شرایط فشار پایه مرسوم (بیش از 10^{-6} toIT) ممکن است شامل ناخالصی‌هایی در شکل اکسید، نیتريد و کاربید باشد که آنها را کمتر درخور کاربردهایی با حساسیت بالا مانند میکروالکترونیک‌ها و حسگرها قرار می‌دهد. بنابراین، این شرایط می‌تواند برای کاربردهای محافظتی مورد ملاحظه قرار گیرد. در کاربردهای محافظتی مانند مقاومت به خوردگی یا پوشش‌های بیومواد، ضخامت لایه‌ها تأثیر زیادی بر خواص ساختاری، سطحی و استحکام چسبندگی آنها به زیرلایه دارد [۶].

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن AISI 316L مورد استفاده به عنوان زیرلایه.

عنصر	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
درصد وزنی	۰/۰۳	۰/۴۴	۱/۲	۰/۰۳۴	۰/۰۰۳	۱۶/۶	۲/۲۵	۱۰/۳	باقیمانده

دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مدل Autoprobe CP با مد تماسی^۶ بررسی شد. در این آزمون محدوده آنالیز $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ و سرعت اسکن ۱ Hz در نظر گرفته شد.

به علاوه مقاومت به خوردگی فولاد زنگ نزن AISI 316L (نمونه شاهد) و ضخیم‌ترین لایه نازک تیتانیم ایجاد شده توسط آزمون پلاریزاسیون مورد ارزیابی قرار گرفت. این آزمون در یک سل الکتروشیمیایی استاندارد EG&G شامل سه الکتروود کاری (نمونه)، کمکی (پلاتین) و مرجع (کالومل اشباع شده) و حاوی محلول بدن شبیه‌سازی شده^۷ (SBF) انجام شد. ترکیب شیمیایی محلول SBF مورد استفاده در آزمون پلاریزاسیون در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): ترکیب شیمیایی محلول SBF مورد استفاده در آزمون پلاریزاسیون.

ترکیب	غلظت (g/l)
NaCl	۸/۰۰
KCl	۰/۴۰
CaCl ₂	۰/۱۸
NaHCO ₃	۰/۳۵
Na ₂ HPO ₄ .2H ₂ O	۰/۴۸
MgCl ₂ .6H ₂ O	۰/۱۰
KH ₂ PO ₄	۰/۰۶
MgSO ₄ .7H ₂ O	۰/۱۰
گلوکز	۱/۰۰

آزمون پلاریزاسیون توسط یک دستگاه پتانسیواستات EG&G مدل 273 A انجام شد و برای رسم منحنی‌ها از روش پلاریزاسیون پتانسیودینامیک استفاده گردید. در طول مدت آزمون دمای محلول توسط یک بخاری آکواریوم که دارای ترموستات بود، در $37 \pm 1^\circ\text{C}$ منطبق با دمای بدن، ثابت نگهداشته

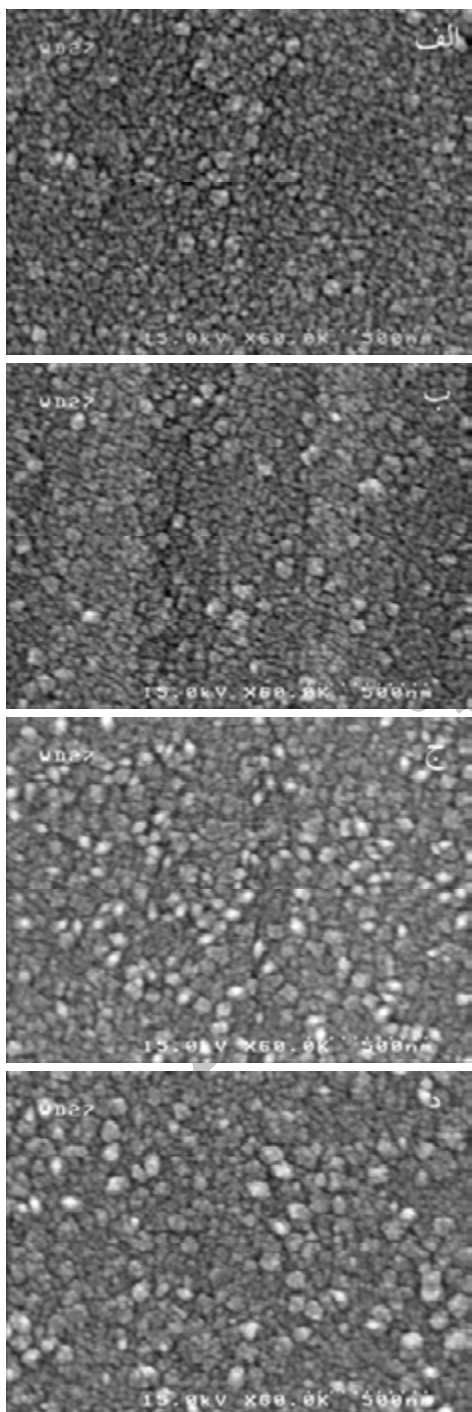
به منظور ایجاد لایه‌های نازک تیتانیم از یک دستگاه PVD-DC Magnetron Sputtering دست‌ساز استفاده شد. در این دستگاه از یک هدف تیتانیم با درجه خلوص ۹۹/۹۹٪ استفاده گردید. همچنین گاز آرگون به عنوان گاز کاری به کار برده شد. خلوص گاز ۹۹/۹۹٪ و جریان آن در طول فرآیند پراکنش ثابت بود. با توجه به قابلیت‌ها و شرایط بهینه دستگاه، فشار پایه 2×10^{-6} torr، فشار گاز آرگون $2/4 \times 10^{-2}$ torr و توان کاتدی ۱۰۰ W در نظر گرفته شد. فاصله هدف-زیرلایه (۳/۲ cm) نیز ثابت بود. همچنین مدت زمان رسوب‌دهی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه تعیین شد.

پیش از عملیات رسوب‌دهی، هدف تیتانیم به منظور تمیزکاری و زدودن آلودگی‌ها و اکسیدهای سطحی‌اش تحت عملیات پیش-پراکنش قرار گرفت. به این منظور محفظه رسوب تا فشار پایه 2×10^{-6} torr خلأ شده و هدف در فشار گاز آرگون $2/4 \times 10^{-2}$ torr و توان کاتدی ۱۰۰ W پراکنش شد. پیش-پراکنش به مدت ۱۵ دقیقه یعنی تا زمانی که تابش پلاسمای معرف تیتانیم (رنگ آبی تیره) ظاهر شد، انجام گرفت. ضخامت لایه‌های نازک تیتانیم با استفاده از یک دستگاه پروفیل‌سنج 3 Dektak مدل 2.13 اندازه‌گیری شد. برای تعیین ضخامت، ابتدا روکش نمونه‌های روکش دار جدا شده تا یک پله به ارتفاع اختلاف سطح لایه از زیرلایه به وجود آید. در این آزمون طول رویش $1200 \mu\text{m}$ و سرعت رویش پایین (۳۰ ثانیه) در نظر گرفته شد و داده‌های مربوط به 1200 نقطه ثبت گردید.

همچنین مورفولوژی سطح لایه‌ها توسط یک دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) Hitachi مدل S-4160 بررسی شد. در این آزمون، ولتاژ کاری ۱۵ kV در نظر گرفته شد.

توپوگرافی سطح لایه‌های نازک تیتانیم نیز با استفاده از یک

کریستالی با افزایش ضخامت لایه‌های نازک تیتانیم، افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت لایه‌های نازک تیتانیم، یکنواختی ساختار بیشتر می‌شود.

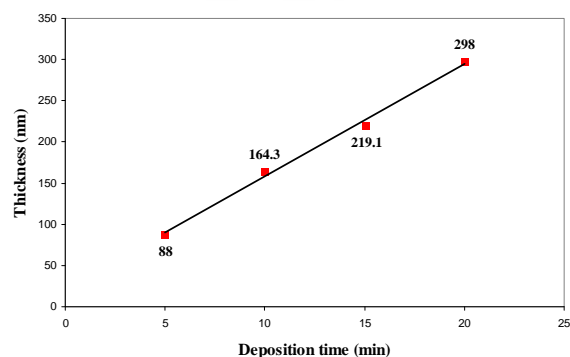


شکل (۲): تصاویر FESEM سطح لایه‌های نازک تیتانیم با ضخامت‌های (الف): ۸۸ nm، (ب): ۱۶۴/۳ nm، (ج): ۲۱۹/۱ nm و (د): ۲۹۸ nm.

شد. همچنین محدوده پتانسیل از ۵۰۰- تا ۲۰۰۰ mV+ (نسبت به پتانسیل مدار باز) با سرعت روبش ۰/۵ mV/s در نظر گرفته شد. پیش از انجام پلاریزاسیون، هر نمونه به مدت یک ساعت در دمای ۳۷°C بدون اعمال جریان در معرض محلول قرار گرفت تا پتانسیل مدار باز آن به حالت تعادل برسد.

۳- نتایج و بحث

شکل (۱) منحنی تغییرات ضخامت لایه‌های نازک تیتانیم نسبت به مدت زمان رسوب‌دهی را نشان می‌دهد.



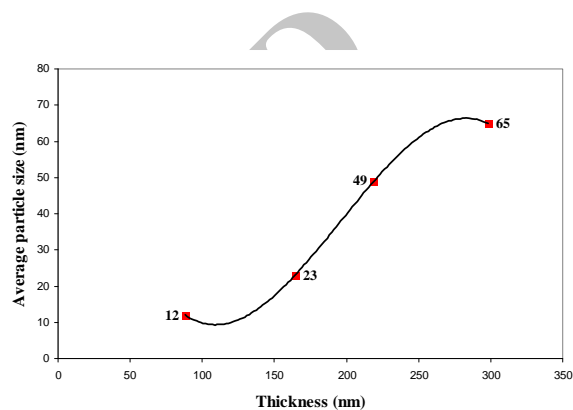
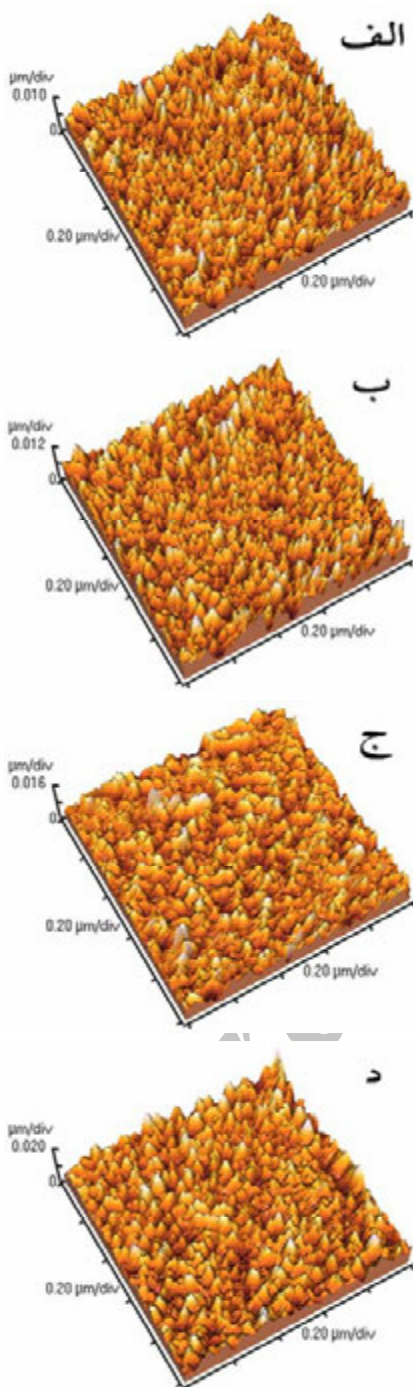
شکل (۱): منحنی تغییرات ضخامت لایه‌های نازک تیتانیم نسبت به مدت زمان رسوب‌دهی.

همان طوری که مشاهده می‌شود با افزایش مدت زمان رسوب‌دهی، مقدار ضخامت لایه‌های نازک تیتانیم افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند به دلیل افزایش میزان پراکنش هدف تیتانیم باشد، به عبارت دیگر هر چه مدت زمان رسوب‌دهی افزایش می‌یابد، مقدار تیتانیم رسوب داده شده روی زیرلایه افزایش یافته و منجر به افزایش ضخامت لایه‌های نازک تیتانیم می‌شود. شیب منحنی «ضخامت نسبت به مدت زمان رسوب‌دهی» نشان‌دهنده سرعت رسوب‌دهی است و همان طوری که در شکل مشاهده می‌شود در طول فرآیند رسوب‌دهی تقریباً ثابت بوده و برابر با ۱۳/۷ nm/min است.

شکل (۲) تصاویر FESEM سطح لایه‌های نازک تیتانیم با ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان طوری که مشاهده می‌شود در همه تصاویر ریزساختاری متراکم، بدون تخلخل و با تفکیک کریستالی خوب وجود دارد که این تراکم و تفکیک

تصویر FESEM سطح لایه نازک تیتانیم با ضخامت ۲۹۸ nm (شکل ۲-د) متراکم‌ترین و یکنواخت‌ترین ساختار با بالاترین تفکیک کریستالی را نشان می‌دهد که در آن نانوذرات تیتانیم، مشهود است.

شکل (۳) منحنی تغییرات اندازه میانگین نانوذرات تیتانیم نسبت به ضخامت لایه‌های نازک تیتانیم را نشان می‌دهد که از تصاویر FESEM آنها استخراج گردیده است.



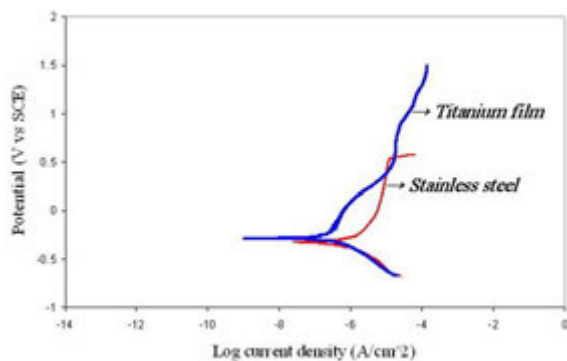
شکل (۳): منحنی تغییرات اندازه میانگین نانوذرات تیتانیم نسبت به ضخامت لایه‌های نازک تیتانیم.

همان‌طوری که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت لایه‌های نازک تیتانیم، اندازه میانگین نانوذرات تیتانیم افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که وقتی جوانه‌ها به تراکم مشخصی می‌رسند با ادامه برخورد ذرات به سطح، دیگر جوانه جدیدی تشکیل نمی‌شود بلکه این ذرات به جوانه‌های قبلی اضافه شده و باعث رشد آنها می‌گردند [۹].

شکل (۴) تصاویر AFM سطح لایه‌های نازک تیتانیم با ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود در همه تصاویر توزیع پستی و بلندی‌ها تقریباً یکسان است، به عبارت دیگر توزیع پستی و بلندی‌ها مستقل از ضخامت لایه‌های نازک تیتانیم می‌باشد. شکل (۵) منحنی تغییرات زبری میانگین سطح نسبت به ضخامت لایه‌های نازک تیتانیم را نشان می‌دهد که از تصاویر AFM آنها استخراج گردیده است.

شکل (۴): تصاویر AFM (سه بعدی) سطح لایه‌های نازک تیتانیم با ضخامت‌های الف): ۸۸ nm، ب): ۱۶۴/۳ nm، ج): ۲۱۹/۱ nm و د): ۲۹۸ nm.

نازک تیتانیم با ضخامت ۲۹۸ nm که از منحنی های پلاریزاسیون آنها استخراج گردیده، آورده شده است.

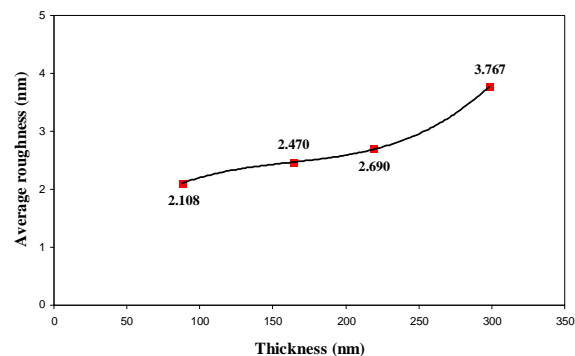


شکل (۶): منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد زنگ نزن AISI 316L و لایه نازک تیتانیم با ضخامت ۲۹۸ nm، در محلول SBF.

جدول (۳): نتایج حاصل از منحنی های پلاریزاسیون فولاد زنگ نزن AISI 316L و لایه نازک تیتانیم با ضخامت ۲۹۸ nm.

نوع نمونه	پتانسیل خوردگی (V vs SCE)	دانشیته جریان خوردگی (nA/cm ²)
فولاد زنگ نزن AISI 316L (نمونه شاهد)	-۰/۳۱۳	۴۵۱/۱
لایه نازک تیتانیم با ضخامت ۲۹۸ nm	-۰/۲۷۹	۱۶۳/۴

بررسی شکل (۶) و جدول (۳) نشان می دهد که ایجاد لایه نازک تیتانیم با ضخامت ۲۹۸ nm روی فولاد زنگ نزن AISI 316L باعث افزایش پتانسیل خوردگی آن از -۰/۳۱۳ V به -۰/۲۷۹ V و کاهش دانشیته جریان خوردگی از ۴۵۱/۱ به ۱۶۳/۴ nA/cm² می شود که در نتیجه مقاومت به خوردگی آن بهبود می یابد. دانشیته جریان خوردگی پایین لایه نازک تیتانیم ممکن است به لایه نانومتری اکسید تیتانیم (۱۵-۱۰ nm) موجود در سطح نسبت داده شود که باعث کاهش حملات خوردنده می شود [۵].



شکل (۵): منحنی تغییرات زبری میانگین سطح نسبت به ضخامت لایه های نازک تیتانیم.

همان طوری که مشاهده می شود با افزایش ضخامت لایه های نازک تیتانیم، مقدار زبری میانگین سطح افزایش می یابد که این امر می تواند به دلیل افزایش برخورد ذرات باردار و الکترون ها به سطح در طول فرآیند رسوب دهی باشد، به عبارت دیگر هر چه مدت زمان رسوب دهی افزایش می یابد، میزان برخورد ذرات باردار و الکترون ها به سطح لایه افزایش یافته و منجر به ایجاد پستی و بلندی های بیشتر و بالا رفتن زبری می شود.

جیاچاندردان^۱ و همکارانش گزارش نموده اند که خصوصیات توپوگرافی سطح لایه های نازک تیتانیم ایجاد شده تحت شرایط مرسوم به عوامل فشار پایه، فشار گاز آرگون و توان کاتدی بستگی ندارند [۱].

شکل (۶) منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فولاد زنگ نزن AISI 316L (نمونه شاهد) و لایه نازک تیتانیم با ضخامت ۲۹۸ nm را در محلول SBF نشان می دهد.

با توجه به منحنی ها مشاهده می شود که با ایجاد لایه نازک تیتانیم با ضخامت مناسب روی فولاد زنگ نزن، منحنی پلاریزاسیون به سمت چپ و بالا منتقل شده که نشان دهنده افزایش پتانسیل خوردگی، کاهش دانشیته جریان خوردگی و در نتیجه بهبود مقاومت به خوردگی آن است.

در جدول (۳) مقادیر پتانسیل خوردگی و دانشیته جریان خوردگی فولاد زنگ نزن AISI 316L (نمونه شاهد) و لایه

- [4] H.W. Han and N.E. Lee, "Sputter Deposition Modeling of Ti Thin Film on A Sharp Tip", Thin Solid Films, Vol. 475, pp. 144-149, 2005.
- [5] C.V. Franco, L.C. Fontana, D. Bechi, A.E. Martinelli and J.L.R. Muzart, "an Electrochemical Study of Magnetron-Sputtered Ti- and TiN-Coated Steel" Corrosion Science, Vol. 40, pp. 103-112, 1998.
- [6] Y.L. Jeyachandran, B. Karunagaran, Sa.K. Narayandass and D. Mangalaraj, "The Effect of Thickness on The Properties of Titanium Films Deposited by Dc Magnetron Sputtering", Materials Science & Engineering A, Vol. 458, pp. 361-365, 2007 .
- [7] F. Hellal, F. Atmani, B. Malki, H. Sedjal, M. Kerkar and F. Dalard, "Study of Corrosion Behaviour of Ti-coated AISI 316L Stainless Steel in a Simulated Body Fluid Solution", 9th International Symposium of Passivation of Metals and Semiconductors and Properties of Thin Oxide Layers, France, pp. 371-376, 2005 .
- [8] C. Fonceca, F. Vaz, M.A. Barbosa, "Electrochemical Behaviour of Titanium Coated Stainless Steel by R.F. Sputtering in Synthetic Sweat Solutions for Electrode Applications", Corrosion Science, Vol. 46, pp. 3005-3018, 2004.
- [9] L. Eckertova, Physics of Thin Films, 2nd ed, Plenum Pub, 1990.

۶- پی نوشت

- 1- Very Larg Scale Integration
- 2- MicroElectroMechanical System
- 3- Bolometer
- 4- Single electron transistors
- 5- Implant
- 6- Contact mode
- 7- Simulated Body Fluid
- 8- Jeyachandran

۴- نتیجه گیری

از مجموع مطالعات، آزمایش‌ها، نتایج و بحث‌های انجام شده، می‌توان نتایج زیر را ارائه نمود:

۱- لایه نازک تیتانیم با ضخامت ۲۹۸ nm از متراکم‌ترین و یکنواخت‌ترین ساختار برخوردار بوده و دارای بیشترین مقادیر اندازه میانگین نانوذرات تیتانیم (۶۵ nm) و زبری میانگین سطح (۳/۷۶۷ nm) است.

۲- ایجاد لایه نازک تیتانیم با ضخامت ۲۹۸ nm روی فولاد زنگ نزن AISI 316L باعث افزایش پتانسیل خوردگی آن از ۰/۳۱۳- به ۰/۲۷۹- و کاهش دانسیته جریان خوردگی از ۴۵۱/۱ به ۱۶۳/۴ nA/cm² می‌شود که در نتیجه مقاومت به خوردگی آن بهبود می‌یابد.

۵- مراجع

- [1] Y. L. Jeyachandran, B. Karunagaran, Sa. K. Narayandass, D. Mangalaraj, T.E. Jenkins and P.J. Martin, "Properties of Titanium Thin Films Deposited by Dc Magnetron Sputtering", Materials Science & Engineering A, Vol. 431, pp. 277-284, 2006.
- [2] Y. Khelfaoui, M. Kerkar, A. Bali and F. Dalard, "Electrochemical Characterization of a PVD Film of Titanium on AISI 316L Stainless Steel", Surface & Coatings Technology, Vol. 200, pp. 4523-4529, 2006.
- [3] K. A. Whitehead and J. Verran, "The Effect of Surface Properties and Application Method on The Retention of Pseudomonas Aeruginosa on Uncoated and Titanium-Coated Stainless Steel", International Biodeterioration & Biodegradation, Vol. 60, pp. 74-80, 2007.