

آندایزینگ تیتانیم در الکتrolیت های اسیدی و بررسی مقاومت به خوردگی آن در محلول فیزیولوژیک PBS

عبدالله افشار^۱ و محمدرضا واعظی^{۲*}

^۱دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی علم و مواد

^۲پژوهشگاه مواد و انرژی

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۷/۱۰/۱۵، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۸۸/۲/۳۰، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۸۸/۸/۲۸

چکیده تیتانیم فلز بسیار فعالی است که در معرض هوا یا محیط های حاوی اکسیژن، لایه نازک اکسیدی بر روی سطح آن تشکیل می شود. با توجه به مقاومت به خوردگی کم این لایه اکسیدی در محلول های حاوی یون کلر (مانند محلول های فیزیولوژیک بدن)، با آندایزینگ تیتانیم، لایه اکسید تیتانیم با ضخامت های بیشتر و خواص مطلوب تر روی تیتانیم ایجاد می شود. در این مقاله، آندایزینگ تیتانیم در محلول های اسیدسولفوریک و اسیدفسفریک در شرایط گالوانواستات در دمای ۲۵°C انجام شده و مقاومت به خوردگی نمونه های تیتانیم آندایز شده در محلول فیزیولوژیک PBS (Phosphate-Buffered Saline) بررسی شده است. نتایج نشان می دهند در این محلول ها، لایه های تشکیل شده ابتدا فشرده و سپس متخلخل (کاهش پتانسیل) و پایدار می شوند. این لایه ها متخلخل نسبتاً بالایی دارند و بررسی های تفرق اشعه ایکس (XRD) نشان داد که ترکیب لایه های آندی ایجاد شده روی تیتانیم به صورت TiO₂ (آناتاز یا روتیل) است و ساختار آمورف دارد. نتایج به دست آمده از بررسی های مقاومت به خوردگی نشان می دهند که مقاومت به خوردگی تیتانیم بسیار کم است و افزایش ضخامت این لایه، سرعت خوردگی را بسیار کاهش می دهد. همچنین عملیات حرارتی تیتانیم آندایز شده در دمای ۶۰۰°C هیچ گونه تأثیری در مقاومت به خوردگی آن ندارد.

کلمات کلیدی تیتانیم، محلول فیزیولوژیک، آندایزینگ، گالوانواستات، مقاومت به خوردگی.

Anodizing Of Titanium in Acidic Electrolytes and Evaluation of Its Corrosion Resistance in PBS Physiologic Solution

A. Afshar¹ and M.R. Vaezi^{*2}

¹Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology

²Materials and Energy Research Center

Abstract Titanium is a highly reactive metal so that whenever it is exposed to air or other environment containing available oxygen, a thin layer of oxide is formed on the surface. Due to low corrosion resistance of this layer in environments containing Cl⁻ ions (physiologic solutions), anodic oxidation of titanium is performed. In this research, anodizing of titanium is galvanostatically performed in H₂SO₄ and H₃PO₄ at 25°C and corrosion resistance of anodized specimen in PBS (phosphate- buffered saline) has been studied. The results show that the layers formed are compact at first and then have been porous and finally reach to the steady state. These contain high porosity and XRD studies show that the composition of layers is TiO₂ (anatase or rutile) and have amorphous structure. The results obtained from corrosion resistance studies show that the corrosion resistance of anodized titanium is less than the non-anodized titanium and increasing the thickness of layer decreased its corrosion rate. Also, the heat treatment of anodized titanium is not affected in the corrosion resistance.

Keywords Titanium, Physiologic Solution, Anodizing, Galvanostat, Corrosion Resistance.

*عهده دار مکاتبات

نشانی: کرج، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی.

تلفن: ۰۲۶۱-۶۲۰۴۱۳۱، دور نگار: ۰۲۶۱-۶۲۰۴۱۳۲، پیام نگار: vaezi9016@yahoo.com

۱- مقدمه

بافت نزدیک به مواد کاشتنی وارد نموده اند، ولی پس از آندایزینگ تیتانیم و کاشت آن در داخل بدن، سرعت خوردگی کاهش یافته و همچنین سرعت ترمیم استخوان به شدت افزایش یافته است [۸،۷].

۲- نحوه انجام آزمایش

۲-۱- آماده سازی نمونه ها

نمونه هایی از جنس تیتانیم خالص تجاری با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ با ابعاد $25 \times 20 \times 2$ mm تهیه شد، سپس با استن چربی گیری شد و پس از شستشو با آب، با اسیدفلوئوریدریک ۴۰ گرم بر لیتر اسیدشویی شد. پس از چربی گیری و اسیدشویی، نمونه ها با کاغذ سنباده با شماره های ۵۰۰، ۳۲۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ و سپس با پودر آلومینای ۰/۳ و ۰/۵ میکرون صیقل یافته و پس از شستشو با آب، در هوای گرم خشک شده اند.

۲-۲- آزمایشات

عملیات آندایزینگ در محلول های اسیدسولفوریک و اسیدفسفریک تحت شرایط گالوانواستات (جریان ثابت) صورت گرفته است. ترکیب شیمیایی، غلظت محلول، دانسیته جریان و دمای آندایزینگ در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی تیتانیم مورد استفاده.

عنصر	تیتانیم	آهن	اکسیژن	کربن
درصدوزنی	پایه	۰/۳۷	۰/۲۲	۰/۰۶

بسته به نوع کاربرد تیتانیم، آندایزینگ آن در محلول های اسیدی یا قلیایی با استفاده از روش های گالوانواستات (جریان ثابت) یا پتانسیو استات (پتانسیل ثابت) صورت می گیرد [۱]. لایه های آندایز را می توان با ضخامت کم یا زیاد ایجاد کرد [۲،۳،۴]. در بیشتر موارد، آندایزینگ با ضخامت کم در محلول های اسیدی انجام می شود [۵]. لایه های آندایز رنگی (از زرد تا آبی لاجوردی) در محلول های اسیدسولفوریک یا اسیدفسفریک ایجاد می شوند. این نوع پوشش ها عمدتاً در مواد کاشتنی بدن یا جواهرسازی کاربرد دارند [۴،۵].

جراحی و دندان سازی مدرن به فلزات و آلیاژهایی با خنثائیت شیمیایی بسیار بالا و استحکام مکانیکی کافی نیاز دارد. سبکی و خواص مکانیکی و شیمیایی خوب تیتانیم از خصوصیات برجسته کاربرد آن برای کاشتن در بدن انسان محسوب می شود [۶] و به دلیل سازگاری خوبی که با محیط بدن دارد و منجر به هیچ گونه واکنش ترمبوزی (تشکیل لخته خون درون قلب و یا عروق خوبی) با خون بدن انسان نمی شود و هم چنین به دلیل وجود لایه TiO_2 روی سطح آن هیچ نوع حساسیتی در بدن انسان ایجاد نمی کند، ماده کاشتنی مناسبی در کاربردهای پزشکی محسوب می شود [۷].

سازگاری کاشتنی های فلزی به شدت به رفتار خوردگی آنها ارتباط دارد. خوردگی و حل شدن لایه سطحی، دو مکانیزم اصلی ورود یون های اضافی در بدن انسان می باشد و نتیجه گیری شده است که سازگاری ماده کاشتنی با بدن انسان، فقط توسط محصولات خوردگی نیست، بلکه توسط محصولات واکنش های مختلف حاوی ترکیبات بافت نیز می باشد. گزارش شده است که مواد کاشتنی تیتانیمی (آندایز نشده) که به مدت چند سال در بدن انسان کار گذاشته شده اند، سرعت های اکسیداسیون بالایی داشته و مقادیر نسبتاً زیادی از ترکیبات تیتانیمی را در

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آندایزینگ تیتانیم

منحنی های تغییرات پتانسیل نسبت به زمان آندایزینگ در محلول اسیدسولفوریک ۰/۵ مولار در دانسیته جریان ۵ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع، اسیدفسفریک ۰/۳ مولار در دانسیته جریان های ۳ و ۶ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع، به ترتیب در شکل های ۱ و ۲ آمده است. همان گونه که ملاحظه می شود، منحنی های تغییرات پتانسیل نسبت به زمان را می توان به سه ناحیه تقسیم کرد. ناحیه اول، ناحیه ای است که با افزایش زمان آندایزینگ، ولتاژ به طور خطی افزایش می یابد؛ این ناحیه مربوط به رشد لایه اکسیدی فشرده است. پس از مرحله خطی، پتانسیل به

از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای اندازه گیری ضخامت لایه ها و بررسی مورفولوژی و از تکنیک XRD برای بررسی ساختار لایه ها استفاده شده است.

برای بررسی اثر عملیات حرارتی بر ساختار لایه های ایجاد شده، تعدادی از نمونه ها پس از آندایزینگ در دمای ۶۰۰°C به مدت ۱ ساعت تحت اتمسفر گاز آگون حرارت داده شد و در داخل کوره سرد شده اند.

رفتار خوردگی تیتانیم آندایز شده و نشده در محلول PBS در دمای ۳۷°C با استفاده از روش پلاریزاسیون (پتانسیودینامیک) بررسی شده است. جدول ۳، ترکیب شیمیایی محلول PBS را نشان می دهد. نرخ روبش پتانسیل ۱mv/sec بوده و سرعت خوردگی به روش پلاریزاسیون خطی محاسبه شده است.

جدول ۲. محلول ها و شرایط آندایزینگ تیتانیم.

جنس کاتد	دما (درجه سانتیگراد)	دانسیته جریان (mA/cm ²)	غلظت محلول (مولار)	ترکیب شیمیایی
پلاتین	۲۵	۵	۰/۵	اسید سولفوریک
فولاد ضد زنگ ۳۱۶	۲۵	۳	۰/۳	اسیدفسفریک
فولاد ضد زنگ ۳۱۶	۲۵	۶	۰/۳	اسیدفسفریک

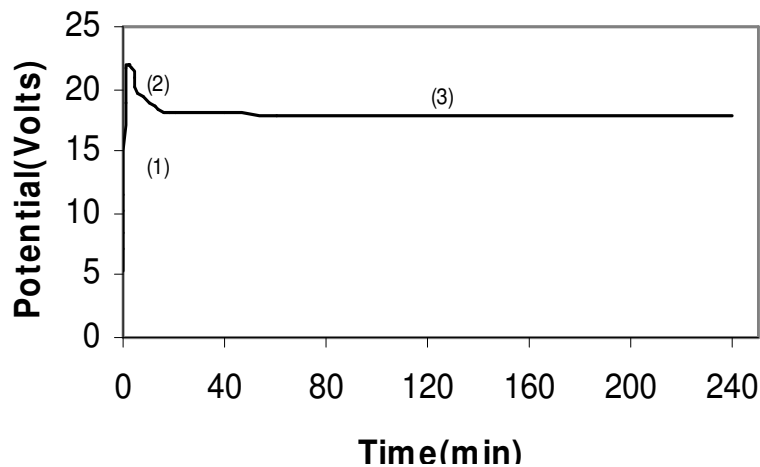
جدول ۳. ترکیب شیمیایی محلول فیزیولوژیک PBS.

NaHPO ₄ .12H ₂ O	NaCl	KH ₂ PO ₄	ترکیب شیمیایی
۳/۵۸	۸/۷۷	۱/۳۶	غلظت (g/l)

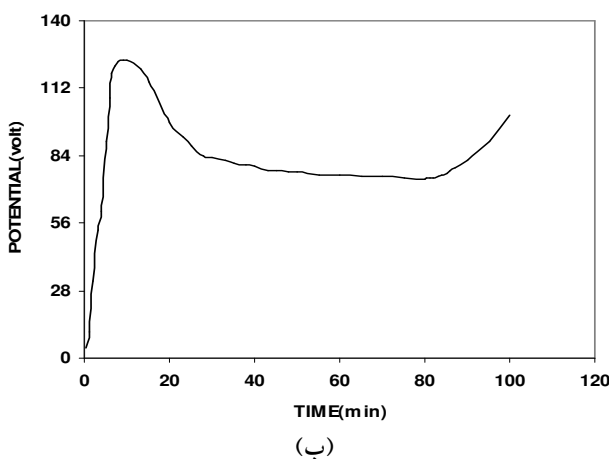
اکسیدی است.

ضخامت و رنگ لایه‌های آندی ایجاد شده در محلول‌های اسیدسولفوریک و اسیدفسفریک در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است. مطابق جداول ۴ و ۵، ضخامت لایه‌ها تا رسیدن به منطقه پایدار زیاد می‌شود ولی پس از ورود به این ناحیه، با افزایش زمان، تغییر محسوسی در ضخامت لایه‌ها ایجاد نمی‌شود. رفتار آندایزینگ آلومینیم در محلول‌های اسیدی نیز مشابه با

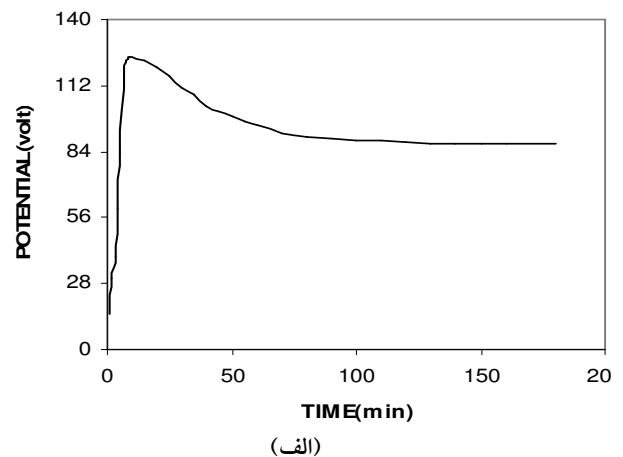
مقدار ماکزیمم می‌رسد، و سپس پتانسیل نسبت به زمان کاهش می‌یابد؛ این ناحیه مربوط به جوانه‌زنی و تشکیل حفره هاست. پس از آن، تغییرات پتانسیل نسبت به زمان ثابت می‌ماند و در این ناحیه، لایه اکسیدی به حالت پایدار^۱ می‌رسد و مشخصات خود را باز می‌یابد [۸،۷]. همان‌طور که در شکل ۲(ب) ملاحظه می‌شود، پتانسیل پس از ۸۰ دقیقه دوباره افزایش می‌یابد که این افزایش مجدد ناشی از تخریب لایه



شکل ۱. منحنی تغییرات پتانسیل نسبت به زمان برای آندایزینگ تیتانیم در محلول اسیدسولفوریک.



(ب)



(الف)

شکل ۲. منحنی تغییرات پتانسیل نسبت به زمان برای آندایزینگ تیتانیم در محلول اسیدفسفریک در دانسیته جریان‌های الف. 3 mA/cm^2 و ب. 6 mA/cm^2 .

1. Steady State.

جدول ۴. ضخامت و رنگ لایه‌های آندایز ایجاد شده در محلول اسید سولفوریک.

۲۴۰	۱۲۰	۹۰	۶۰	۲۸	۱۶	۲/۵	۱/۲	زمان (دقیقه)
۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۱	ضخامت (میکرون)
بنفش	بنفش	بنفش	بنفش	بنفش	آبی ارغوانی	آبی ارغوانی	آبی ارغوانی	رنگ لایه

جدول ۵. ضخامت و رنگ لایه‌های آندایز ایجاد شده در محلول اسید فسفریک.

دانسیته جریان ۶ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع			دانسیته جریان ۳ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع		
رنگ لایه	ضخامت (میکرون)	زمان (دقیقه)	رنگ لایه	ضخامت (میکرون)	زمان (دقیقه)
بنفش	۰/۱	۱۳	بنفش	۰/۱۱	۸
سبز کم رنگ	۰/۱۲	۲۸	سبز	۰/۱۴	۸۰
صورتی متمایل به زرد	۰/۱۳	۴۰	صورتی	۰/۱۵	۱۴۰
صورتی	۰/۱۳	۸۰	سبز متمایل به زرد	۰/۱۵	۱۶۰
			زرد	۰/۱۵	۱۸۰

تیتانیم را نشان نداد و فقط پیک‌های تیتانیم در دیفراکتوگرام حضور داشتند. این امر می‌تواند ناشی از دو عامل زیر باشد: یکی آنکه لایه آندایز بسیار نازک است؛ لذا پیک‌های تیتانیم زمینه به دست آمده است. دیگر آنکه ممکن است لایه اکسیدی آمورف باشد.

پس از عملیات حرارتی نمونه‌های فوق در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد در اتمسفر حاوی گاز آرگون به مدت یک ساعت، پیک مربوط به TiO_2 (آاناتاز) در زاویه $2\theta=29/5^\circ$ و پیک مربوط به TiO_2 (روتیل) در زاویه $2\theta=32/5^\circ$ ظاهر شدند (شکل‌های ۵، ۴، ۳). این امر نشان می‌دهد که پس از عملیات حرارتی، کریستالیزاسیون صورت گرفته است که این موضوع

این رفتار تیتانیم است با این تفاوت که در آندایزینگ آلومینیم، پس از ورود به ناحیه پایدار، با افزایش زمان، ضخامت لایه افزایش می‌یابد. بنابراین زمان مناسب برای آندایزینگ تیتانیم در محلول‌های اسیدی نظیر اسید سولفوریک و اسید فسفریک، زمانی است که نمونه به ناحیه پایدار می‌رسد.

دیفراکتوگرام به دست آمده از تفرق اشعه ایکس برای نمونه‌های تیتانیمی که به مدت ۲۴۰ دقیقه در محلول اسید سولفوریک، ۱۸۰ دقیقه در محلول اسید فسفریک (دانسیته جریان ۳ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع) و ۸۰ دقیقه در محلول اسید فسفریک (دانسیته جریان ۶ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع) تحت عملیات آندایزینگ قرار گرفته بودند، هیچ گونه پیک اکسید

نیز توسط پائولی و همکارانش اثبات شده است [۴]. لذا می توان نتیجه گرفت ساختار لایه های آندی ایجاد شده روی تیتانیم آمورف بوده است.

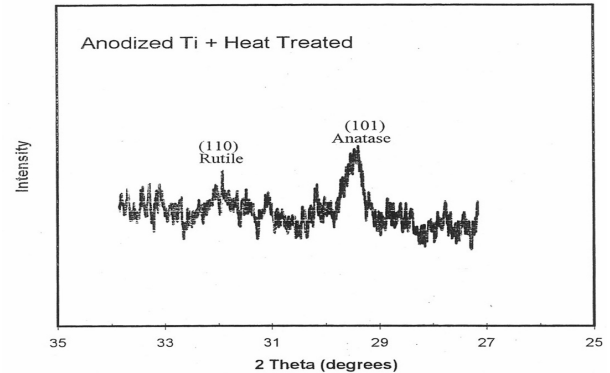
تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه ای که به مدت ۹۰ دقیقه در محلول اسیدسولفوریک ۰/۵ مولار آندایز شده، در شکل ۶ نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، ساختار لایه آندایز ایجاد شده تخلخل نسبتاً بالایی دارد و ضروری است پس از آندایزینگ، عملیات آب بندی لایه ها صورت گیرد. آب بندی در مورد لایه های ایجاد شده در محلول اسیدفسفریک گزارش نشده است که ممکن است به دلیل تخلخل کمتر این لایه ها باشد [۹].

۲-۳- بررسی مقاومت به خوردگی در محلول فیزیولوژیک PBS

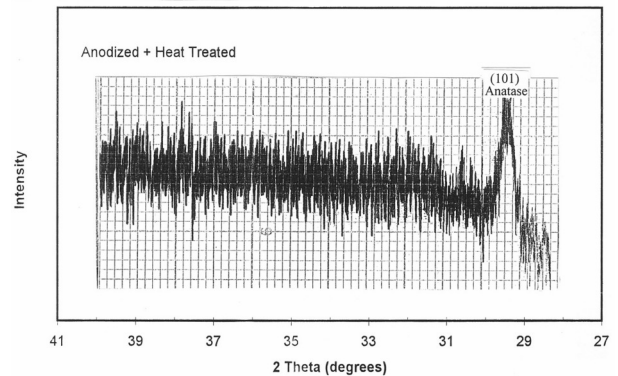
نتایج حاصل از منحنی پلاریزاسیون تیتانیم آندایز نشده در محلول PBS در دمای ۳۷°C در جدول ۶ ارائه شده است. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح تیتانیم آندایز نشده پس از انجام آزمایش خوردگی در شکل ۷ نشان



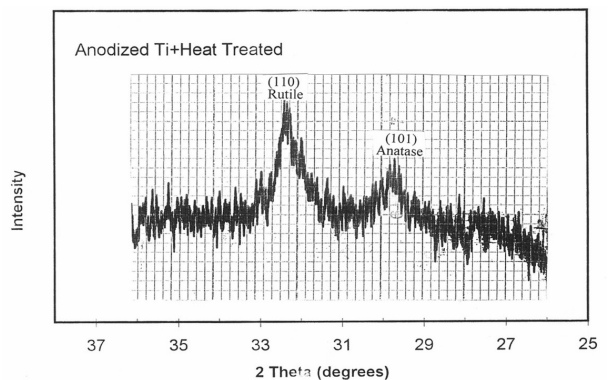
شکل ۶. تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح تیتانیم آندایز شده در محلول اسید سولفوریک به مدت ۹۰ دقیقه.



شکل ۳. دیفراکتوگرام تیتانیم آندایز شده در محلول اسید سولفوریک پس از عملیات حرارتی در دمای ۶۰۰°C.



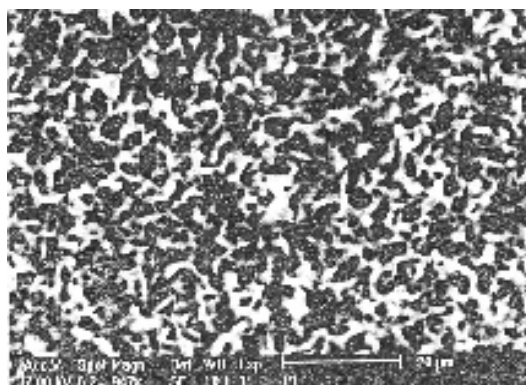
شکل ۴. دیفراکتوگرام تیتانیم آندایز شده در محلول اسید فسفریک (دانسیته جریان ۳mA/cm²) پس از عملیات حرارتی در دمای ۶۰۰°C.



شکل ۵. دیفراکتوگرام تیتانیم آندایز شده در محلول اسیدفسفریک (دانسیته جریان ۶mA/cm²) پس از عملیات حرارتی در دمای ۶۰۰°C.

جدول ۶. نتایج حاصل از منحنی پلاریزاسیون تیتانیم آندایز نشده در محلول PBS.

سرعت خوردگی (mpy)	پتانسیل خوردگی (ولت)	دانسیتته جریان خوردگی (A/cm ²)	دانسیتته جریان روئین (A/cm ²)	پتانسیل بحرانی (ولت)	دانسیتته جریان (A/cm ²)
۱۳/۴۳	-۰/۱۵	۳/۹×۱۰ ^{-۵}	--	-۰/۰۲	۰/۰۰۱



شکل ۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح تیتانیم آندایز نشده پس از آزمایش خوردگی در محلول PBS.

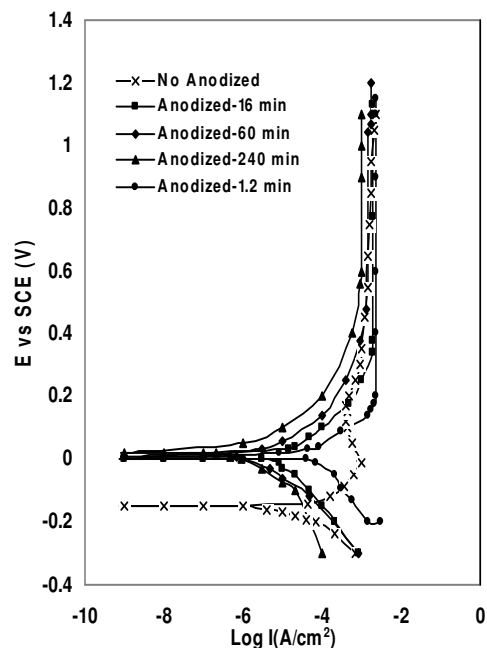
کاهش یافته است.

تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح تیتانیم آندایز شده در محلول اسیدسولفوریک به مدت ۶۰ دقیقه و در محلول اسیدفسفریک به مدت ۸ دقیقه و پس از آزمایش خوردگی، به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده اند. مطابق شکل، سطح نمونه های آندایز شده در محلول اسیدسولفوریک، پس از آزمایش خوردگی، تخلخل کمی دارد.

آنالیز نقطه ای EDS تیتانیم آندایز شده در محلول اسید سولفوریک به مدت ۱/۲ دقیقه و تیتانیم آندایز شده در محلول اسیدفسفریک به مدت ۱۴۰ دقیقه پس از آزمایش خوردگی نیز به ترتیب در شکل های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده اند. مطابق شکل ۱۲، پیک های TiK و OK حضور دارند و درصد های وزنی تیتانیم و اکسیژن نشان می دهند پس از انجام آزمایش

داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، سطح تیتانیم حفره دار شده است که منحنی پلاریزاسیون و اندازه گیری سرعت خوردگی نیز این موضوع را (جدول ۶) تأیید می کند. منحنی های پلاریزاسیون تیتانیم آندایز نشده و آندایز شده (در محلول اسیدسولفوریک در مدت زمان های ۱/۲، ۱۶، ۶۰ و ۲۴۰ دقیقه) و تیتانیم آندایز شده (در محلول اسیدفسفریک در دانسیته جریان ۳ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع در مدت زمان های ۸، ۱۴۰ و ۱۸۰ دقیقه) در محلول PBS در دمای ۲۷°C به ترتیب در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده اند. نتایج حاصل از این منحنی ها به ترتیب در جداول ۷ و ۸ ارائه شده اند. با توجه به جداول ۷ و ۸ ملاحظه می شود که سرعت خوردگی تیتانیم آندایز شده نسبت به تیتانیم آندایز نشده کمتر بوده و با افزایش ضخامت لایه آندایز، سرعت خوردگی آن ها در محلول PBS

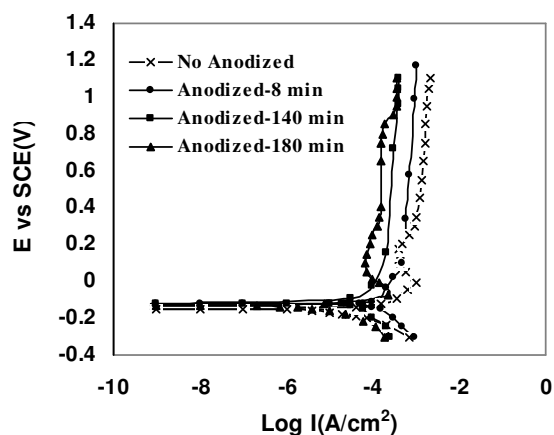
خوردگی در محلول PBS، لایه اکسیدی حل شده است؛ در واقع تخلخل لایه آندایز و ضخامت کم آن باعث حل شدن لایه شده است. مطابق شکل ۱۳، کمی فسفر در لایه آندایز وجود دارد که در هنگام عملیات آندایزینگ از محلول وارد لایه شده است. درصدهای وزنی تیتانیم (۷۳ درصد وزنی) و اکسیژن (۲۷ درصد وزنی) نیز نشان می دهند که پس از آزمایش خوردگی، لایه اکسیدی حل نشده است. همان گونه که قبلاً بحث شد (شکل ۲ را ببینید)، لایه های آندایز ایجاد شده در محلول اسید فسفریک نسبت به لایه های آندایز ایجاد شده در محلول اسید فسفریک تخلخل کمتری دارند و فشرده تر هستند، لذا پس از انجام آزمایش خوردگی، کمتر توسط محلول خورنده مورد تهاجم قرار گرفته؛ لذا حفره های کمتری در آن ایجاد می شود.



شکل ۸. منحنی های پلاریزاسیون تیتانیم آندایز نشده و آندایز شده (در محلول اسید سولفوریک در مدت زمانهای مختلف) در محلول PBS در دمای ۳۷°C.

۴- نتیجه گیری

۱. لایه های آندایز ایجاد شده در محلول اسیدسولفوریک ۰/۵ مولار و اسید فسفریک ۰/۳ مولار در شروع تشکیل فشرده هستند اما با افزایش زمان آندایزینگ متخلخل می شوند.
۲. در حین آندایزینگ، پس از ثابت شدن تغییرات پتانسیل، افزایش زمان تأثیر قابل ملاحظه ای در ضخامت لایه ها ندارد.
۳. بررسی ها نشان می دهند؛ لایه های آندایز ایجاد شده در محلول های اسیدسولفوریک و اسیدفسفریک ساختار آمورف دارند.



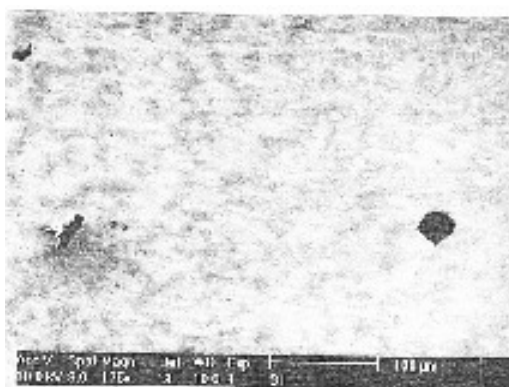
شکل ۹. منحنی های پلاریزاسیون تیتانیم آندایز نشده و آندایز شده (در محلول اسید فسفریک ۰/۳ مولار در دانسیته جریان (۳mA/cm²) در محلول PBS در دمای ۳۷°C).

جدول ۷. نتایج حاصل از منحنی های پلاریزاسیون تیتانیم آندایز شده (در محلول اسیدسولفوریک) در محلول PBS.

سرعت خوردگی (mpy)	پتانسیل خوردگی (ولت)	دانسیتته جریان خوردگی (A/cm^2)	دانسیتته جریان روئین (A/cm^2)	پتانسیل بحرانی (ولت)	دانسیتته جریان بحرانی (A/cm^2)	ضخامت لایه آندایز (میکرون)	زمان آندایزینگ (دقیقه)
۵/۲۹	۰	$1/16 \times 10^{-5}$	--	۰/۲۲۵	۰/۰۱	۰/۱۰	۱/۲
۴/۹۱	۰	$1/08 \times 10^{-5}$	--	--	--	۰/۱۳	۱۶
۴/۱۱	۰/۰۱	$9/01 \times 10^{-5}$	--	--	--	۰/۱۵	۶۰
۳/۲۲	۰/۰۲	$7/07 \times 10^{-5}$	--	--	--	۰/۱۶	۲۴۰

جدول ۸. نتایج حاصل از منحنی های پلاریزاسیون تیتانیم آندایز شده (در محلول اسیدفسفریک) در محلول PBS.

سرعت خوردگی (mpy)	پتانسیل خوردگی (ولت)	دانسیتته جریان خوردگی (A/cm^2)	دانسیتته جریان روئین (A/cm^2)	پتانسیل بحرانی (ولت)	دانسیتته جریان بحرانی (A/cm^2)	ضخامت لایه آندایز (میکرون)	زمان آندایزینگ (دقیقه)
۴/۰۲۵	-۰/۱۳	$8/83 \times 10^{-6}$	--	--	--	۰/۱۱	۸
۳/۷۲۵	-۰/۱۳	$8/17 \times 10^{-6}$	$3/9 \times 10^{-4}$	--	--	۰/۱۵	۱۴۰
۳/۱۱۶	-۰/۱۲	$6/84 \times 10^{-6}$	$3/5 \times 10^{-4}$	-۰/۰۱	$1/4 \times 10^{-4}$	۰/۱۵	۱۸۰



شکل ۱۰. تصویر میکروسکپ الکترونی سطح تیتانیم آندایز شده (در محلول اسید سولفوریک به مدت ۶۰ دقیقه) پس از آزمایش خوردگی در محلول PBS.

۴. مقاومت به خوردگی لایه های آندایز ایجاد شده در محلول اسیدسولفوریک نسبت به محلول اسید فسفریک به دلیل بالاتر بودن میزان تخلخل لایه ها، بیشتر است.

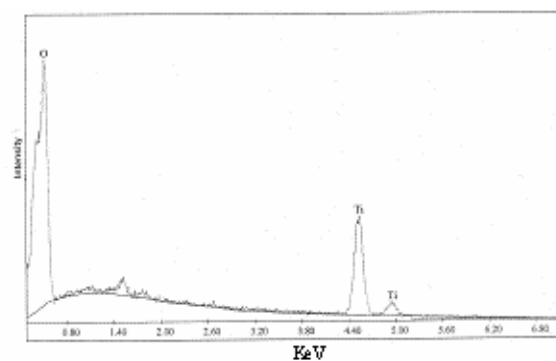
۵. میزان تخلخل و ضخامت لایه های آندایز ایجاد شده بر میزان حل شدن آن ها پس از آزمایش خوردگی در محلول PBS اثر مهمی دارد، به طوری که لایه آندایز ایجاد شده در محلول اسیدسولفوریک (با تخلخل بالا) پس از آزمایش خوردگی حل می شود حال آن که لایه آندایز ایجاد شده در محلول اسیدفسفریک (با تخلخل کمتر) پس از آزمایش خوردگی حل نمی شود.

مراجع

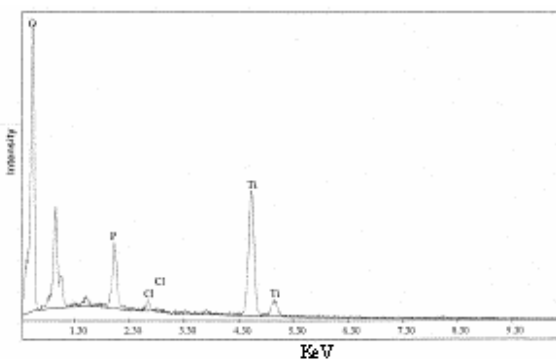
1. Mizushima, W., "A study of the Formation of Anodic Oxide Films on Titanium", *J. Electrochemical Soc.*, (1991) 825.
2. Cikaira, K., Singh. K.C. and Singh, M., "Electrical Breakdown of Anodic Films on Ti", *J. Electrochem. Soc.*, (1994) 43.
3. Johansen, H.A. and Adams, G.B. and Ryselberghe, P., "Anodic Oxidation of Al, Ti and Cr", *J. Electrochem. Soc.*, (1990) 339.
4. Pouilleau, J. and Derilliers Garrido, F., "Durand-Vidal.S. and Mahe, E., "Structure and Composition of Titanium Oxide Films", *Mat. Science and Engineering*, B47 (1997) 235.
5. SAE Specification AMS 2488C "Anodic Treatment of Titanium Alloys", (1994) 4.
6. Hanaawa, T., Ota. *Biomaterials*, Vol. 12 (1991) 767.
7. Park, J. and lakes, R., *Biomaterials an Introduction*, Plenum Press, Newyork, (1992) 56.
8. Healy, K.E. and Ducheyne, P., "The Mechanisms of Passive Dissolution of Ti", *J. Biomed. Mat. Res.*, (1992) 319.



شکل ۱۱. تصویر میکروسکپ الکترونی سطح تیتانیوم آندایز شده (در محلول اسید فسفریک ۰/۳ مولار به مدت ۸ دقیقه) پس از انجام آزمایش خوردگی در محلول PBS.



شکل ۱۲. آنالیز نقطه ای EDS سطح تیتانیوم آندایز شده (در محلول اسید فسفریک به مدت ۱/۲ دقیقه) پس از آزمایش خوردگی در محلول PBS.



شکل ۱۳. آنالیز نقطه ای EDS سطح تیتانیوم آندایز شده (محلول اسید فسفریک به مدت ۸ دقیقه) پس از آزمایش خوردگی در محلول PBS.