

بررسی شکست الکتریکی لایه‌های اکسید آندی ایجاد شده بر روی تیتانیم در محلولهای پایه فسفات

عبدالله افشار* و محمدرضا واعظی**

دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۸۱/۱/۲۴ - دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۷/۱۹)

چکیده - تیتانیم فلز بسیار فعالی بوده و در صورتی که در معرض هوا و یا محیطهای حاوی اکسیژن قرار گیرد، یک لایه نازک اکسیدی بر روی سطح آن تشکیل شده و در نتیجه مقاومت به خوردگی آن را افزایش می‌دهد. تشکیل این لایه به روش الکتروشیمیایی توسط عملیات آندایزینگ نیز امکانپذیر است. در این مقاله، تیتانیم در محلولهای آبی پایه فسفاتی نظیر: اسید فسفریک، فسفات هیدروژن دی سدیم و فسفات دی هیدروژن سدیم با غلظتهای مختلف در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد از روش گالوانواستاتیک در دانسیته جریان ۹/۷۵ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع آندایز شده است. نتایج به دست آمده از منحنیهای پتانسیل - زمان نشان می‌دهند که لایه‌های آندایز ایجاد شده، فشرده و ضخامت آنها تابع نوع و غلظت محلول است. ساختار لایه‌های آندایز توسط تکنیکهای تفرق اشعه ایکس^۱ و میکروسکپ الکترونی روبشی^۲ بررسی و نشان داده شده است که این ساختارها آمورف اند. تأثیر غلظت، ترکیب شیمیایی محلول و مقاومت الکتریکی در ولتاژ شکست با توجه به مدل تجمع و تسریع الکترونی اینوپیزو بررسی و نتایج نشان داد که با افزایش غلظت محلول، ولتاژ شکست کاهش می‌یابد. مهمترین پارامتر مؤثر در کاهش ولتاژ شکست، افزایش غلظت الکترولیت است که سبب افزایش جریان الکترونی اولیه (j_0) می‌شود.

واژگان کلیدی: تیتانیم، آندایزینگ، شکست الکتریکی، محلول فسفات، اکسید آندی

Evaluation of Electrical Breakdown of Anodic Films on Titanium in Phosphate-base Solutions

A. Afshar and M.R. Vaezi

Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology

Abstract: Titanium is a highly reactive metal so that a thin layer of oxide forms on its surface whenever exposed to the air or other environments containing oxygen. This layer increases the corrosion resistance of titanium. The oxide film is electrochemically formed through anodizing. In this study, anodizing of titanium was performed in phosphate-base solutions such as H_3PO_4 , NaH_2PO_4 and Na_2HPO_4 at $9.75mA/cm^2$ and $35^\circ C$ under galvanostatic conditions. The Potential-Time curves in the above solutions show that the anodic films formed on titanium are compact and their thickness depends on the solution type and concentration. The SEM and XRD techniques show that these layers are amorphous. In this paper, the effect of electrolyte concentration, composition and resistivity on breakdown voltage have been discussed in terms of Ikonopisov electron avalanche

** دانشجوی دکترا

* دانشیار

breakdown model. This model shows that the major factor contributing to the decrease in breakdown voltage is the increased electrolyte concentration leading to increased primary electronic current.

Keywords: Titanium, Anodizing, Electrical Breakdown, Phosphate Solutions, Andic oxide

۱- مقدمه

آندایزینگ تیتانیم را می‌توان در محلولهای اسیدی و یا قلیانی تحت شرایط جریان ثابت (گالوانواستات) و یا پتانسیل ثابت (پتانسیواستات) انجام داد [۱]. با توجه به نوع کاربرد، ضخامت‌های کم و یا زیاد لایه‌های آندایز قابل‌ایجادند [۲-۴]. آندایزینگ با ضخامت کم اکثراً در محلولهای اسیدی انجام می‌شود [۵]. پوشش‌های آندایز رنگی (از زرد تا آبی لاجوردی) در محلولهای اسید سولفوریک و یا اسید فسفریک قابل‌ایجادند. این نوع پوششها عمدتاً در مواد کاشتنی در بدن و یا جواهرسازی کاربرد دارند [۶ و ۷]. آنالیز طیف سنجی الکترون‌اوزه^۳ لایه‌های آندایز شده در محلول اسید فسفریک نشان داده است که آنها شامل درصد کمی فسفرند. لایه‌های آندایز ایجاد شده در محلولهای پایه فسفات نظیر اسید فسفریک، فسفات دی‌هیدروژن سدیم و فسفات هیدروژن دی‌سدیم فشرده و از لحاظ الکتریکی عایق مناسبی بوده و ضخامت آنها نسبت به محلول اسید سولفوریک بیشتر است [۸].

در عملیات آندایزینگ، لایه ایجاد شده در یک ولتاژ مشخص (ولتاژ شکست) دارای یک ضخامت بحرانی بوده و در بالاتر از آن لایه شکسته می‌شود. از کاهش نرخ افزایش ولتاژ [۹]، ظهور جرقه‌های مرئی [۱۰]، ترک خوردن آشکار لایه و بالا و پایین رفتن سریع ولتاژ [۱۱]، توسط محققان مختلف برای تعریف ولتاژ شکست استفاده شده است. شکست الکتریکی لایه‌های اکسید آندی تیتانیم در محلولهای پایه فسفات از روی منحنیهای عکس ظرفیت - شارژ عبوری ($1/C - Q$) را می‌توان مورد بررسی قرار داد. این منحنیها در ابتدا به صورت خطی (رشد لایه) و سپس ثابت می‌ماند که نشان دهنده رسیدن به ضخامت حدی است. شارژ مورد نیاز برای رسیدن به این حد، به طور جزئی با پتانسیل‌اعمالی زیاد می‌شود و سپس $1/C$

کم شده که نشان دهنده شکست لایه اکسیدی است [۱۱]. اینویز و همکارانش یک مدل تنوری را برای شکست الکتریکی لایه‌های آندایز شده پیشنهاد کرده‌اند که این مدل، مبنی بر تجمع و تسریع (Avalanche) الکترونها در فصل مشترک اکسید - الکترولیت است [۱۲].

بر اساس این مدل، رابطه بین ولتاژ شکست با مقاومت و غلظت الکترولیت و معادله بین دانسیته جریان الکترونی (J_e) و مقاومت الکترولیت توسط معادلات ذیل بیان می‌شوند:

$$V_B = a_c + b_c \log C \quad (1)$$

$$V_B = a_B + b_B \log p \quad (2)$$

$$\log J_e = \log a_e - b_e \log p \quad (3)$$

a_c ، b_c ، a_B ، b_B ، a_e ، b_e مقادیر ثابتی‌اند. در معادلات فوق، V_B ولتاژ شکست، C غلظت الکترولیت و p مقاومت الکترولیت است. آقای اینویز و همکارانش از معادله (۲) مقادیر ثابت a_B و b_B را برای یک الکترولیت (با غلظت و دمای مشخص) در دانسیته‌جریان مشخص به صورت زیر نتیجه‌گیری کرد:

$$a_B = (E_m / re) (\log J_B - \log a_e) \quad (4)$$

$$b_B = (2.303 / re) E_m b_e$$

در این معادله E_m انرژی آستانه‌ای برای یونیزاسیون برخوردی^۴، r ثابت ترکیب مجدد^۵، J_B مقدار دانسیته جریان الکترونی در یک ضخامت مشخص برای تخریب لایه اکسیدی، e شارژ الکترونی و a_e و b_e ثوابت وابستگی جریان الکترونی به مقاومت‌اند. ثابت r و E_m برای تیتانیم آندایز شده مقادیر مشخصی‌اند. از معادله (۴) می‌توان معادله (۵) را به دست آورد:

$$b_B / b_e = 2.303 E_m / re \quad (5)$$

در دما و دانسیته جریان ثابت و ترکیب مشخص الکترولیت، طرف راست معادله (۵) ثابت است. نسبت b_B / b_e برای محلول اسید فسفریک مقدار $663/9$ ، برای محلول فسفات دی‌هیدروژن

سدیم مقدار ۷۵۴/۹ و برای فسفات هیدروژن دی سدیم مقدار ۷۲۷/۵ است که این نسبت تقریباً ثابت است [۱۱].

طبق مدل اینویزو، دانسیته جریان الکترونی در آند از معادله زیر به دست می‌آید:

$$J_e = J_0 \exp(\alpha d) \quad (6)$$

در این معادله، J_0 دانسیته جریان الکترونی تزریق شده به باند هدایت لایه اکسیدی از فصل مشترک اکسید - الکترولیت و $\alpha = reE/\epsilon_m$ میدان و d فاصله طی شده توسط الکترونهاى اولیه برای رسیدن به آند) ضریب یونیزاسیون برخوردار است. با تقریب می‌توان فرض کرد که d معادل با ضخامت کل لایه است که به‌طور خطی با ولتاژدر حین آندایزینگ در جریان ثابت افزایش می‌یابد. از این رو $d = V/E$ ثابت آندایزینگ است. مقادیر J_0 از عرض از مبدأ منحنیهای خطی $\log J_e$ برحسب V (وقتی $d=0$ و $V=0$ و $J_e=J_0$) به دست می‌آیند.

با استفاده از معادله (۴) و $\alpha = reE/\epsilon_m$ معادله زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = 2.303Eb_e/b_B \quad (7)$$

با فرض آنکه وقتی جریان تجمع و تسریع الکترونی به کسر مشخصی از جریان کلی آندایزینگ (J_1) برسد شکست اتفاق می‌افتد، می‌توان تغییرات ولتاژ شکست را نسبت به غلظت و ترکیب الکترولیت برآورد کرد. تحت این شرایط، معادله به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$J_0 \exp(\alpha d) = ZJ_1 \quad (8)$$

و داریم:

$$\begin{aligned} ZJ_1/J_0 &= \exp(\alpha d) \\ d &= (2.303/\alpha) \log ZJ_1/J_0 \\ V_B &= (2.303E/\alpha) \log ZJ_1/J_0 \end{aligned} \quad (9)$$

که معادله (۹)، به معادله اینویزو موسوم است [۱۱]. آبل و همکارانش از مدل اینویزو برای تشریح جزئیات پدیده شکست استفاده کرده‌اند. از آنجایی که مدل‌های پیشنهاد شده برای توضیح شکست الکترونی لایه‌های آندایز، مستلزم تزریق الکترونها از الکترولیت به لایه اکسیدی است، لذا نقش جریان الکترونی بسیار مهم است [۹]. در این تحقیق، اثر دانسیته جریان، غلظت و مقاومت الکترولیت بر ولتاژ شکست لایه آندایز بررسی و ثوابت

معادله اینویزو نیز به دست آورده شده است. همچنین اثر شکست الکتریکی بر ساختار لایه‌های آندایز مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

نمونه‌هایی از جنس تیتانیم خالص (تجاری) با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول (۱) با ابعاد $25 \times 20 \times 20$ mm تهیه و سپس توسط استن چربی گیری و پس از شستشو با آب، توسط اسید فلئوریدریک ۴۰ گرم بر لیتر اسید شویی شده‌اند. پس از چربی گیری و اسید شویی، نمونه‌ها توسط کاغذ سنباده با شماره‌های ۳۲۰، ۵۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ و سپس با پودر آلومینای ۰/۳ و ۰/۵ میکرون صیقل داده شده و پس از شستشو با آب، با هوای گرم خشک شده‌اند.

۲-۲- آزمایشات

برای انجام آندایزینگ تیتانیم از محلولهای اسید فسفریک، فسفات دی هیدروژن سدیم و فسفات هیدروژن دی سدیم با غلظتهای ۰/۵-۰/۱، ۰/۰۱-۰/۰۵، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۵ (مولار) استفاده شده است. عملیات آندایزینگ در یک سل مکعبی شکل از جنس فولاد زنگ نزن ۳۱۶ با ابعاد $10 \times 10 \times 5$ cm (به عنوان کاتد) که حاوی محلول آندایز و الکترودهای تیتانیم (نمونه) است به صورت گالوانواستات در دانسیته جریان ۹/۷۵ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع انجام شده است. در طی مراحل آندایزینگ، منحنیهای تغییرات پتانسیل نسبت به زمان نیز رسم شده‌اند. مدت زمان آندایزینگ در هر یک از محلولهای فوق به اندازه‌ای است که پتانسیل به ولتاژ شکست برسد (زمان بهینه).

برای بررسی اثر عملیات حرارتی در ساختار لایه‌ها، تعدادی از نمونه‌ها پس از آندایزینگ در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت تحت اتمسفر آرگون حرارت داده شده و در داخل کوره سرد شده‌اند. ضخامت لایه‌های آندایز شده، توسط میکروسکپ الکترونی اندازه‌گیری شده است. از میکروسکپ

جدول ۱- ترکیب شیمیایی تیتانیم مورد استفاده

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

الکترونی رویشی و تفرق اشعه ایکس برای بررسی مورفولوژی، ساختار و تخلخل لایه‌ها استفاده شده است.

برای اندازه‌گیری دانسیته جریان الکترونی در غلظت‌های مختلف محلول‌های آندایز، نمونه‌هایی در دانسیته جریان $9/75 \text{ mA/cm}^2$ تحت شرایط پتانسیواستات انجام شده و تغییرات جریان نسبت به زمان ثبت شده است (این تغییرات با نرخ کمی کاهش یافته و سپس به مقدار ثابت می‌رسد. این مقدار ثابت تحت عنوان دانسیته جریان الکترونی گزارش شده است).

۳- نتایج و بحث

منحنی‌های تغییرات پتانسیل نسبت به زمان آندایزینگ در دانسیته جریان ثابت $9/75$ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع در غلظت‌های مختلف محلول‌های اسید فسفریک، فسفات هیدروژن دی سدیم و فسفات دی هیدروژن سدیم در شکل‌های (۱) تا (۳) نشان داده شده‌اند. همان گونه که ملاحظه می‌شود، در محلول‌های مختلف در یک غلظت ثابت، با افزایش زمان آندایزینگ، پتانسیل به صورت نمایی افزایش یافته و لیکن در یک محلول مشخص، با افزایش غلظت، پتانسیل کاهش می‌یابد. با توجه به مکانیزم تشکیل لایه‌های آندایز، با افزایش پتانسیل، ضخامت لایه به صورت فشرده تا یک پتانسیل مشخصی افزایش یافته و سپس به دلیل افزایش مقاومت لایه و گرم شدن آن، لایه ترک دار شده و در نتیجه مقاومت آن کاهش یافته و سبب افت پتانسیل می‌شود. [۸].

مقاومت الکترولیتها، ولتاژ شکست و دانسیته جریان الکترونی اندازه‌گیری شده در محلول‌های مورد آزمایش در جدول (۲) ارائه شده‌اند. همان طوری که ملاحظه می‌شود، ولتاژ شکست بستگی به نوع و غلظت محلول داشته و با افزایش غلظت، ولتاژ شکست کاهش می‌یابد.

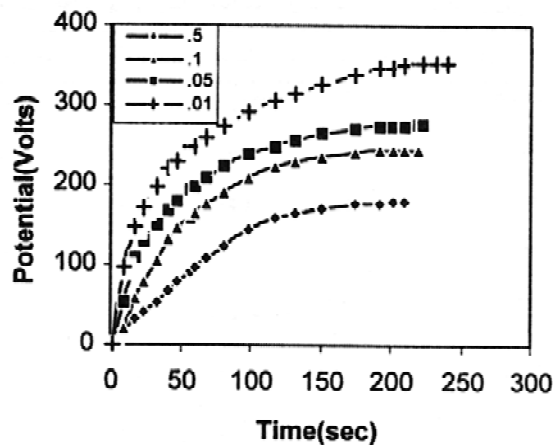
منحنی‌های تغییرات دانسیته جریان الکترونی نسبت به غلظت محلولها، در شکل (۴) نشان داده شده‌اند. همان طوری که ملاحظه می‌شود با افزایش غلظت محلول، مقاومت آن کاهش یافته و در نتیجه دانسیته جریان الکترونی افزایش می‌یابد. علت این تغییرات به این صورت بیان می‌شود که: در ابتدای فرایند آندایزینگ، یک جریان الکترونی اولیه به‌باند هدایت لایه اکسیدی تزریق می‌شود. از آنجاییکه ضخامت لایه اکسیدی کم است، شدت میدان در فصل مشترک لایه اکسیدی و محلول بسیار بالاست و بنابراین در این ناحیه، الکترون‌های تزریق شده به لایه اکسیدی شتاب دارمی‌شوند. انرژی الکترون‌های شتاب‌دار شده به اندازه‌ای است که می‌تواند الکترون‌های دیگر را نیز شتابدار کند. با ادامه فرایند آندایزینگ، الکترون‌های بیشتری به لایه اکسیدی تزریق شده و تجمع و تسریع الکترونی اتفاق می‌افتد و باعث شکست الکترونی لایه اکسیدی می‌شود. نقش جریان الکترونی در شکست الکترونی لایه توسط محققان دیگر نیز به اثبات رسیده است [۱۳].

[۱۴]. با افزایش غلظت محلول، شکست لایه اکسیدی در پتانسیل‌های کمتری اتفاق می‌افتد و بنابراین ولتاژ شکست با افزایش غلظت محلول کاهش می‌یابد.

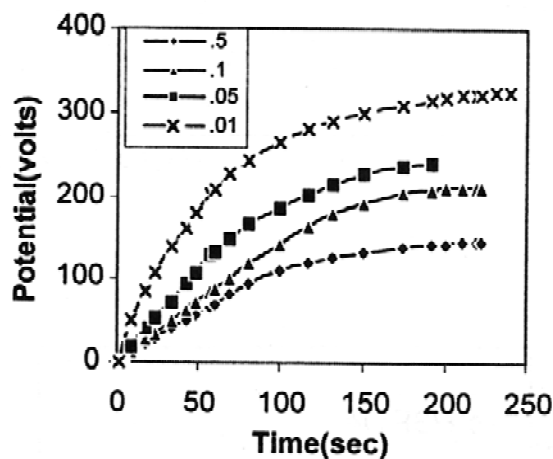
منحنی‌های تغییرات ولتاژ شکست نسبت به غلظت و مقاومت محلول‌های اسید فسفریک، فسفات دی هیدروژن سدیم و فسفات هیدروژن دی سدیم به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده‌اند.

همان گونه که ملاحظه می‌شود این منحنیها خطی بوده با استفاده از این منحنیها می‌توان مقادیر a_B ، b_B ارائه شده در معادلات (۱) و (۲) را به دست آورد. مقادیر ثابت فوق برای محلول‌های پایه فسفات در جدول (۳) ارائه شده‌اند.

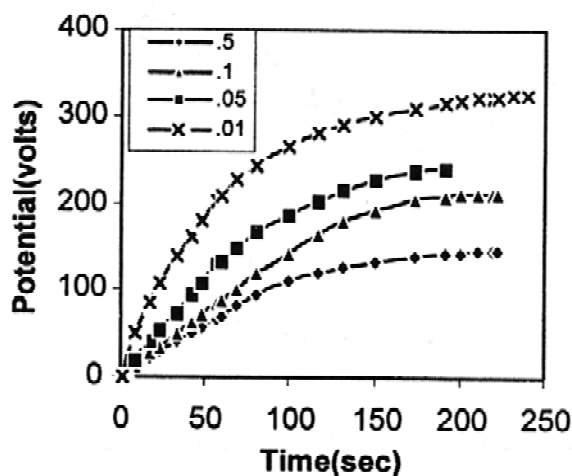
دانسیته جریان الکترونی (J_e) در لایه‌های اکسید تیتانیم در تماس با محلول‌های مختلف (در ولتاژ و دمای ثابت) با افزایش غلظت الکترولیت افزایش یافته و با تغییر ترکیب الکترولیت در همان غلظت تغییر می‌کند. تغییرات J_e نسبت به غلظت و ترکیب الکترولیت به دلیل تغییرات در مقاومت الکترونی محلول است. شکل (۷)، منحنی تغییرات دانسیته جریان الکترونی را



شکل ۱- منحنیهای تغییرات پتانسیل نسبت به زمان آندایزینگ در دانسیته جریان ثابت ۹/۷۵ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع در غلظتهای مختلف محلول اسید فسفریک



شکل ۲- منحنیهای تغییرات پتانسیل نسبت به زمان آندایزینگ در دانسیته جریان ثابت ۹/۷۵ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع در غلظتهای مختلف محلول فسفات هیدروژن دی سدیم

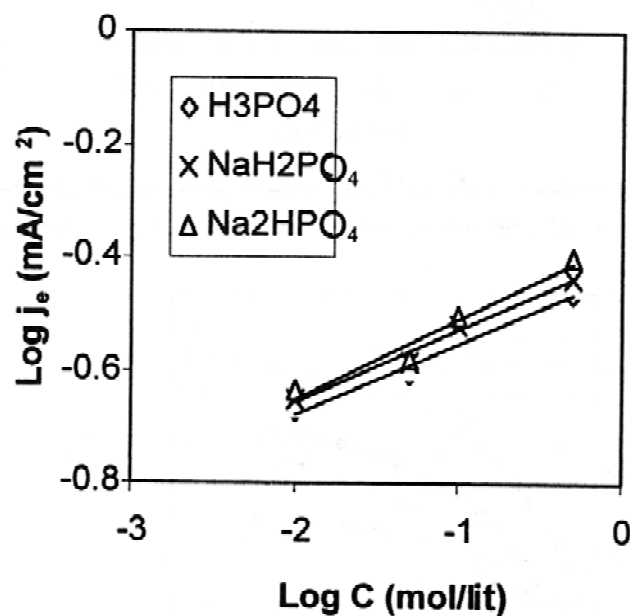


شکل ۳- منحنیهای تغییرات پتانسیل نسبت به زمان آندایزینگ در دانسیته جریان ثابت ۹/۷۵ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع در غلظتهای مختلف محلول فسفات دی هیدروژن سدیم

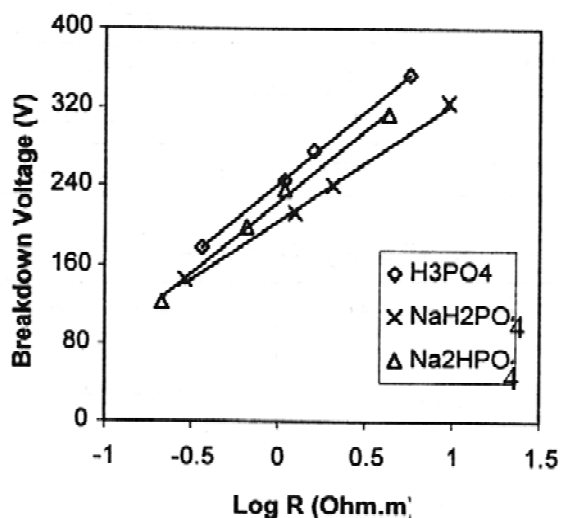
جدول ۲- مقاومت محلولها و ولتاژ شکست و دانسیته جریان الکترونی اندازه گیری شده در آنها

مقاومت الکترولیت $\Omega.m$	دانسیته جریان الکترونی (mA/cm^2)	ولتاژ شکست (ولت)	غلظت محلول (مولار)	محلول آندایزینگ
۵/۶۴۷	۰/۲۱۱*	۳۵۴/۲	۰/۰۱	اسید فسفریک
۱/۶۲۳	۰/۲۴۵	۲۷۵/۹	۰/۰۵	
۱/۰۹۵	۰/۲۹۳	۲۴۵/۱	۰/۱	
۰/۳۶۷	۰/۳۴	۱۷۸/۴	۰/۵	
۹/۳۵	۰/۲۲۲*	۳۲۴/۱	۰/۰۱	فسفات دی هیدروژن سدیم
۲/۰۷	۰/۲۵۸	۲۴۰	۰/۰۵	
۱/۲۳۹	۰/۳۰۲	۲۱۲/۳	۰/۱	
۰/۲۹	۰/۳۶۴	۱۴۴/۳	۰/۵	
۴/۳۴۸	۰/۲۳۱*	۳۱۲/۴	۰/۰۱	فسفات دی هیدروژن سدیم
۱/۰۸۴	۰/۲۶۳	۲۳۶/۴	۰/۰۵	
۰/۶۴۹	۰/۳۱۴	۱۹۹/۳	۰/۱	
۰/۲۱۳	۰/۳۹۸	۱۲۲/۳	۰/۵	

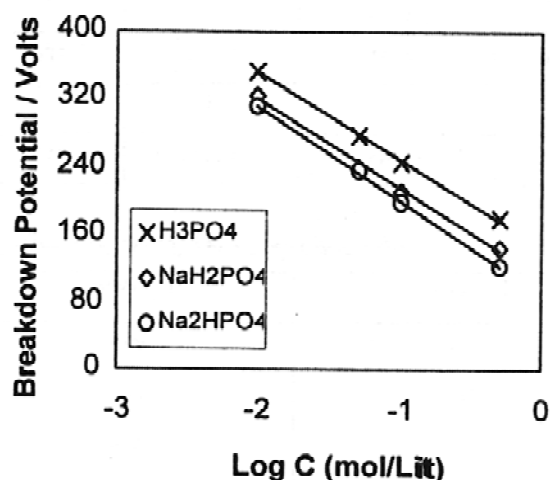
* مقادیر دانسیته جریان الکترونی در ۱۰۰ ولت اندازه گیری شده است.



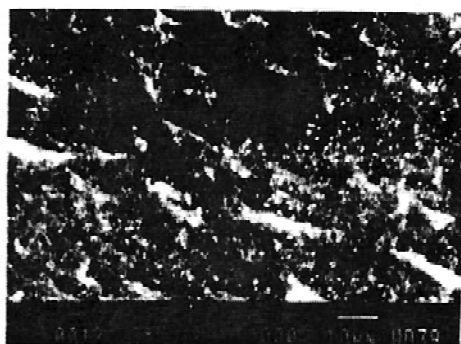
شکل ۴- منحنی تغییرات دانسیته جریان الکترونی نسبت به غلظت محلولهای مورد آزمایش



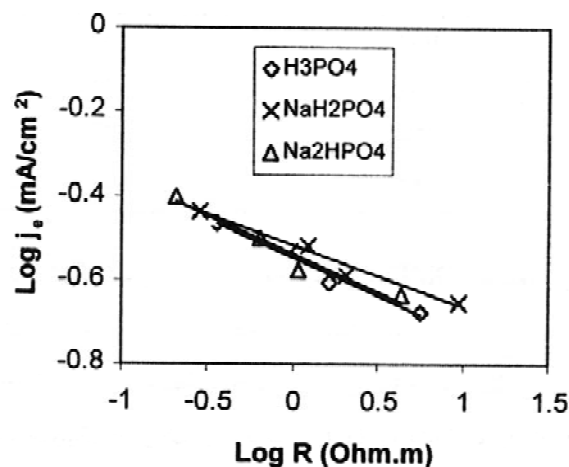
شکل ۶- منحنی تغییرات ولتاژ شکست نسبت به مقاومت محلولهای مورد آزمایش



شکل ۵- منحنی تغییرات ولتاژ شکست نسبت به مقاومت محلولهای مورد آزمایش



شکل ۸- تصویر میکروسکوپی الکترونی سطح تیتانیوم آندایز شده در محلول اسید فسفریک ۵/۰ مولار



شکل ۷- منحنی تغییرات دانسیته جریان الکترونی نسبت به مقاومت محلولهای مورد آزمایش

می‌شود، مقدار α با افزایش غلظت الکترولیت با احتمال اینکه نیروهای بین یونی شدید در غلظتهای بالاتر منتج به ضربه‌های کمتر می‌شوند کاهش می‌یابد.

با توجه به معادله اینویزو معادله (۹)، ولتاژ شکست (V_B) تحت تأثیر پارامترهای E ، α ، Z ، J_1 و J_0 بوده و نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که نسبت E/α در محلولهای مورد

نسبت به مقاومت الکترولیت نشان داده و مطابق شکل، این تغییرات خطی است. مقادیر a_e و b_a ارائه شده در معادله (۳) برای محلولهای مورد آزمایش نیز در جدول (۳) آورده شده‌اند. مقادیر E و ضریب یونیزاسیون برخوردی (α) محاسبه شده از معادله (۷) در غلظتهای مختلف محلولهای مورد آزمایش در جدول (۴) آورده شده‌اند. همان‌طوری‌که در جدول (۴) ملاحظه

جدول ۳- ثوابت اندازه‌گیری شده در محلولهای مختلف

b_e	a_e (mA/cm ²)	b_B (V)	a_B (V)	b_C (V)	a_C (V)	محلول آندایزینگ
۰/۱۸	۰/۲۸۴	۱۴۱/۳	۲۳۵	۱۰۲/۴۹	۱۴۵/۸۹	اسید فسفریک
۰/۱۴	۰/۳۰۲	۱۱۲/۲	۲۰۳	۱۰۵/۴	۱۰۸/۹	فسفات دی هیدروژن سدیم
۰/۱۸۲	۰/۲۸۹	۱۵۲/۸	۲۲۱	۱۱۲/۲۳	۸۸/۴۷	فسفات هیدروژن دی سدیم

جدول ۴- مقادیر میدان الکتریکی (E) و ضریب یونیزاسیون برخوردی (a) در محلولهای مختلف

$10^4 a(1/cm)$	E(MV/m)	غلظت محلول (مولار)	محلول آندایزینگ
۲/۲۷	۷۷۶	۰/۰۱	اسید فسفریک
۲/۱۴	۷۳۱	۰/۰۵	
۱/۹۲	۶۵۵	۰/۱	
۱/۶۳	۵۵۹	۰/۵	
۲/۱۸	۷۶۰	۰/۰۱	فسفات دی هیدروژن سدیم
۲/۰۲	۷۰۴	۰/۰۵	
۱/۸۲	۶۳۳	۰/۱	
۱/۵۶	۵۴۳	۰/۵	
۱/۹۷	۷۲۰	۰/۰۱	فسفات هیدروژن دی سدیم
۱/۸۵	۶۷۴	۰/۰۵	
۱/۶۸	۶۱۳	۰/۱	
۱/۴۵	۵۲۸	۰/۵	

دیفراکتوگرامهای تفرق اشعه ایکس (XRD) ضخیمترین لایه آندایز ایجاد شده در محلولهای اسید فسفریک، فسفات دی هیدروژن سدیم و فسفات هیدروژن دی سدیم با غلظت ۰/۱ مولار، هیچیک از پیکهای مربوط به TiO_2 را نشان نمی‌دهند و فقط پیکهای مربوط به صفحات کریستالی (۰۱۰)، (۰۰۲)، (۰۱۱)، (۰۱۲)، (۱۱۰) و (۱۰۳) تیتانیم ملاحظه می‌شوند. علت عدم تفرق لایه‌های آندایز می‌تواند به دلایل زیر باشد:

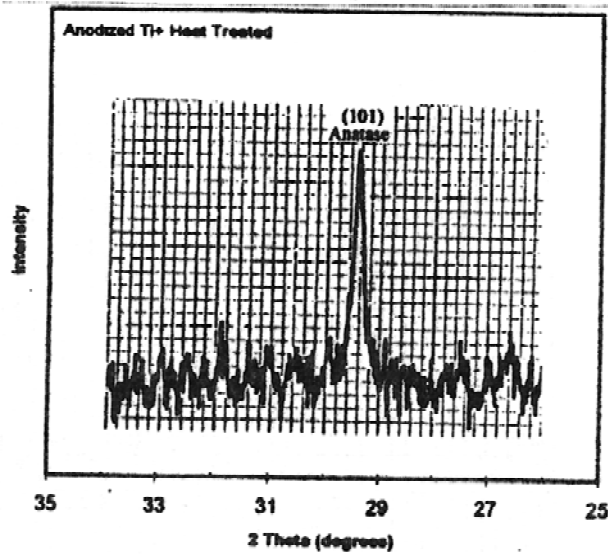
الف) لایه آندایز نازک بوده و در نتیجه پیکهای تیتانیم به‌عنوان فلز پایه تفرق کرده‌اند.

ب) لایه آندایز غیر کریستالی باشد.

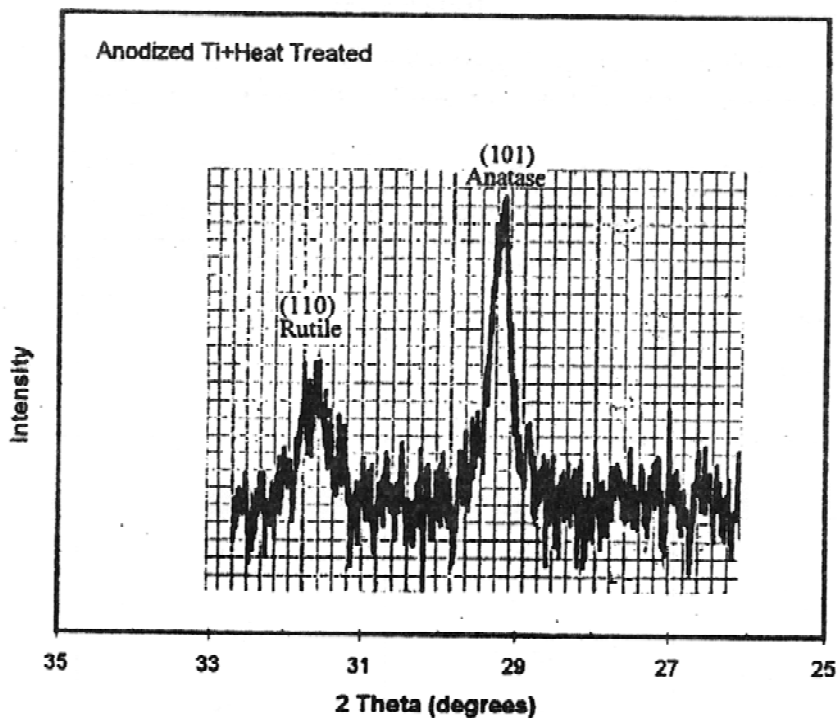
پس از عملیات حرارتی نمونه‌ها در اتمسفر حاوی گاز آرگون در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت، پیک مربوط به TiO_2 (آنتاز) در زاویه $\theta = 29/5^\circ$ و پیک مربوط به TiO_2

استفاده تغییر نمی‌کند (این نسبت برای محلولهای اسید فسفریک، فسفات دی هیدروژن سدیم و فسفات هیدروژن دی سدیم به ترتیب برابر ۲۸۷، ۳۲۷ و ۳۲۴ ولت‌اند). لذا می‌توان بیان کرد که افزایش جریان الکترونی اولیه، عامل اصلی کاهش ولتاژ شکست در اثر افزایش غلظت الکترولیت بوده است که با نتایج به‌دست آمده توسط سایر محققان مطابقت دارد [۱۴].

تصویر میکروسکپ الکترونی سطح تیتانیم آندایز شده در محلول اسید فسفریک ۰/۵ مولار قبل از شکست الکتریکی لایه اکسید آندی در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود، تخلخل لایه آندایز شده کم است و این موضوع با توجه به منحنیهای پتانسیل-زمان، شکلهای (۱) تا (۳) تأیید شده است.



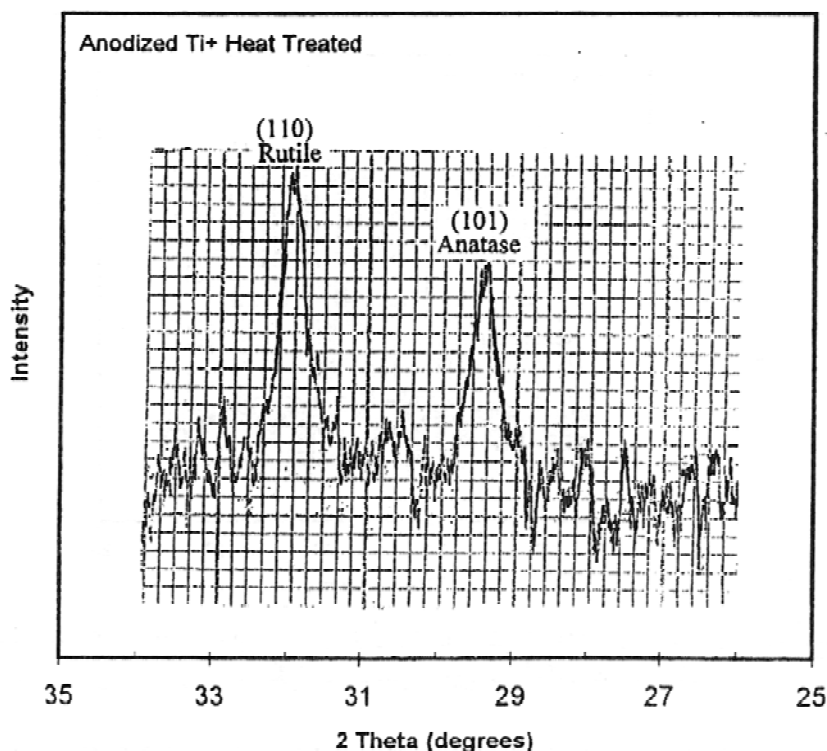
شکل ۹- ديفراکتوگرام تیتانیوم آندایز شده در محلول اسید فسفریک ۰۱٪ مولار پس از عملیات حرارتی در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد در اتمسفر حاوی گاز آرگون به مدت یک ساعت



شکل ۱۰- ديفراکتوگرام تیتانیوم آندایز شده در محلول فسفات دی هیدروژن سدیم ۰۰۱٪ مولار پس از عملیات حرارتی در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد در اتمسفر حاوی گاز آرگون به مدت یک ساعت

آمورف بوده است. ديفراکتوگرامهای تیتانیوم آندایز شده در محلولهای مورد بررسی پس از عملیات حرارتی در شکلهای (۹) تا (۱۱) نشان داده شده‌اند.

(روتیل) در زاویه $2\theta = 32/1$ ظاهر شده‌اند که نشان‌دهنده کریستالیزاسیون ساختار در اثر عملیات حرارتی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که لایه آندایز ایجاد شده دارای ساختاری



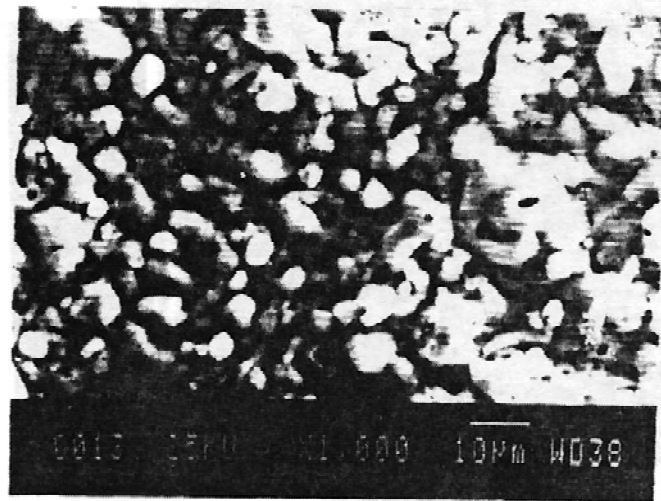
شکل ۱۱- دیفراکتوگرام تیتانیوم آندایز شده در محلول فسفات هیدروژن دی سدیم ۰/۰۱ مولار پس از عملیات حرارتی در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد در اتمسفر حاوی گاز آرگون به مدت یک ساعت

جدول ۵- ضخامت و رنگ لایه‌های آندایز شده در محلولهای پایه فسفات

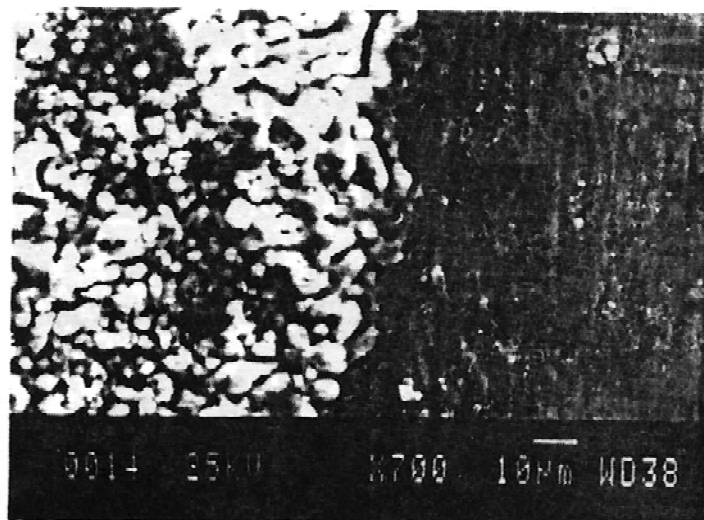
رنگ لایه	ضخامت لایه (میکرون)	غلظت محلول (مولار)	محلول آندایزینگ
صورتی	۰/۳۰۱	۰/۰۱	اسید فسفریک
صورتی کم رنگ	۰/۲۰۲	۰/۰۵	
زرد متمایل به صورتی	۰/۱۷	۰/۱	
سبز متمایل به زرد	۰/۱۰۲	۰/۵	
صورتی	۰/۲۸۹	۰/۰۱	فسفات دی هیدروژن سدیم
سبز پر رنگ	۰/۱۹۱	۰/۰۵	
بنفش	۰/۱۶۸	۰/۱	
زرد متمایل به صورتی	۰/۰۹	۰/۵	
سبز تیره	۰/۲۸۶	۰/۰۱	فسفات هیدروژن دی سدیم
سبز روشن	۰/۱۸۹	۰/۰۵	
صورتی	۰/۱۶۷	۰/۱	
زرد طلایی	۰/۰۸	۰/۵	

همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، ساختار لایه شکسته شده با ساختار لایه آندایز شده در محلول اسید فسفریک، شکل (۸)، متفاوت است. تصویر میکروسکوپی الکترونی لایه تخریب شده

تصویر میکروسکوپی الکترونی لایه آندایز ایجاد شده در محلول فسفات هیدروژن دی سدیم ۰/۵ مولار که تحت شکست الکتریکی قرار گرفته، در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپی الکترونی لایه آندایز (ایجاد شده در محلول فسفات هیدروژن دی سدیم ۰/۵ مولار) شکسته شده



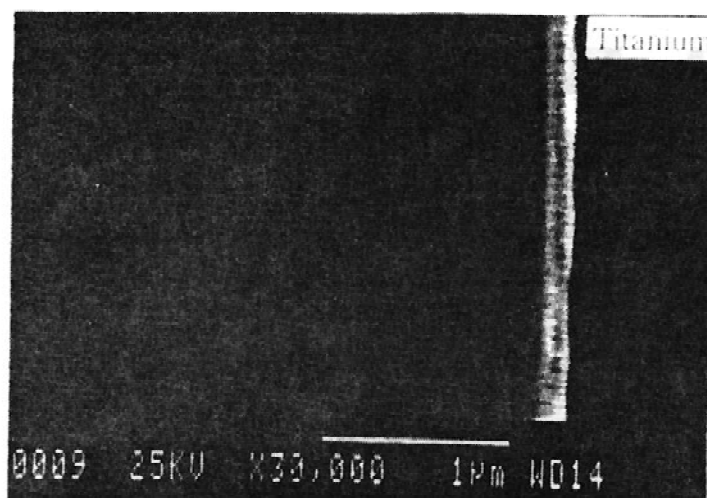
شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپی الکترونی لایه تخریب و تخریب نشده در محلول فسفات هیدروژن دی سدیم ۰/۵ مولار

شکل (۱۴)، تصویر میکروسکوپی الکترونی مقطع عرضی لایه آندایز ایجاد شده در محلول اسید فسفریک ۰/۵ مولار را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، لایه آندایز ایجاد شده نسبتاً یکنواخت است.

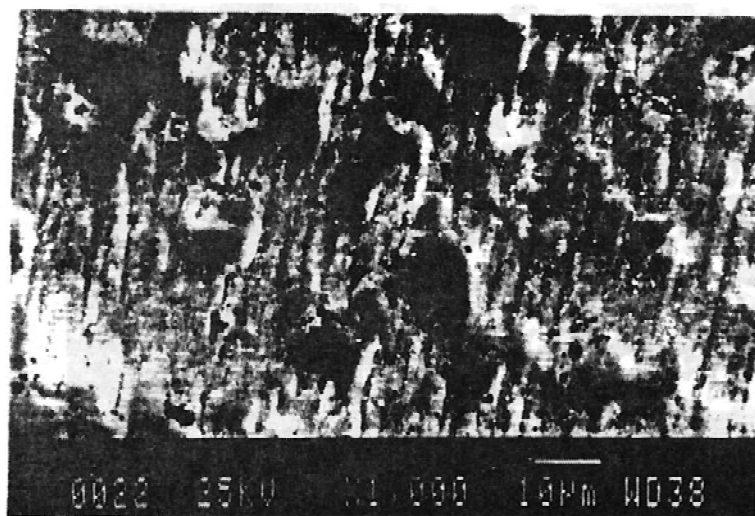
شکل (۱۵)، تصویر میکروسکوپی الکترونی لایه آندایز ایجاد شده در محلول فسفات هیدروژن دی سدیم ۰/۵ مولار را پس از عملیات حرارتی نشان می‌دهد. مقایسه تصاویر شکلهای (۱۴)

و لایه تخریب نشده در شکل (۱۳) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، تخریب شدن لایه‌ها باعث تغییر ساختار آنها شده است.

ضخامت و رنگ لایه‌های آندایز ایجاد شده در محلولهای مختلف در جدول (۵) آورده شده‌اند. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود با افزایش غلظت محلول، ضخامت لایه‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۱۴- تصویر میکروسکوپی الکترونی مقطع عرضی لایه آندایز ایجاد شده در محلول اسید فسفریک ۰/۰۵ مولار



شکل ۱۵- تصویر میکروسکوپی الکترونی لایه آندایز ایجاد شده (در محلول فسفات هیدروژن دی سدیم ۰/۵ مولار) پس از عملیات حرارتی در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد در اتمسفر حاوی گاز آرگون به مدت یک ساعت

رنگ آنها نیز تغییر می‌کند. ولتاژ شکست الکتریکی لایه‌های آندایز شده بستگی به نوع و غلظت محلول‌داشته و با افزایش غلظت، ولتاژ شکست الکتریکی لایه‌ها کاهش می‌یابد. با توجه به مدل اینویزو، ضریب یونیزاسیون برخوردی (α)، پارامتری موثر در تغییر مقدار ولتاژ شکست در مقایسه با افزایش غلظت الکترولیت نیست. افزایش جریان الکترونی اولیه (J_0) که در اثر

و (۱۵) تغییر ساختار از حالت آمورف به کریستالی را نشان می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

لایه‌های آندایز ایجاد شده، فشرده و دارای ساختار آمورف بوده و ضخامت آنها با افزایش غلظت محلولها کاهش یافته و

آندایزینگ، قبل از رسیدن به ولتاژ شکست است.

افزایش غلظت محلول صورت می‌گیرد، پارامتری مؤثر در کاهش ولتاژ شکست لایه است. همچنین، مناسبترین زمان

واژه نامه

- | | | |
|---------------------------------|---|----------------------|
| 1. x-ray diffraction | 4. threshold energy for impact ionization | 6. interionic forces |
| 2. scanning electron microscopy | 5. recombination constant | |
| 3. auger electron spectroscopy | | |

مراجع

1. Mizushima, W., "A Study of the Formation of Anodic Oxide Films on Titanium" *Journal of Electrochemical Society*, Vol 138, pp. 825-829, 1991
2. Kalra, K.C., Singh, K.C., and Singh, M., "Electrical Breakdown of Anodic Films on Ti in Aqueous Electrolytes", *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 371, pp. 73-78, 1997.
3. Johansen, H.A., Adams, G.B., Rysselberghe, P. V., "Anodic Oxidation of Al, Cr, Hf, Nb, Ti, Ta, V and Zr at very low Current Densities", *Journal of Electrochemical Society* Vol. 137, pp. 339-346, 1993.
4. Pouilleau, J. Devilliers, D. Garrido, F., Durand-Vidal, S., Mahe, E., "Structure and Composition of Passive Ti Oxide Films" *Material Science and Engineering B47*, pp 235-243, 1997.
5. SAE Specification AMS 2488C, "Anodic Treatment, Titanium and Titanium Alloys", pp. 4-10, 1994.
6. Healy, K. E., Ducheyne, P., "Calcium Phosphate Naturally Formed on Titanium in Electrolyte Solution", *Journal of Biomedical Materials Research*, Vol. 26, pp. 319-338, 1992
7. ASM Handbook, "Corrosion", Vol.13, 8th Edition, pp. 390-395, 1990.
8. Goossens, "Anodic Oxidation of Titanium in H₂SO₄", *Surface Science*, Vol. 737, pp. 390-398, 2000.
9. Pan, J., Thierry D. and C. Leygraf., "Electrochemical and XPS Studies of Titanium for Biomaterial Applications with Respect to the Effect of Hydrogen Peroxide", *Journal of Biomedical Materials Research*, Vol. 28, pp. 113-122, 1994.
10. Hugot-Le, A., Goff, L., "Structure of very thin TiO₂ Films Studied by Raman Spectroscopy with Interference Enhancement", *Thin Solid Films*, 142, pp. 193-197, 1996.
11. Thomas, N.T., Nobe, K., "The Electrochemical Behaviour of Titanium, Effect of pH and Chloride Ions", *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 139, pp. 1450-1456, 1992
12. Arsov, L. D., Kormann, C., Plieth, W., "Electrical Breakdown of Anodic Films at high Voltage.", *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 138, pp. 2964-2970, 1991.
13. Kinard, L., united state Patent, No. 5, 837, 121, "Method for Anodizing Valve Metal", pp. 5-9, 1999.
14. Kalra K.C., Singh K.C., Singh, M., "Dielectric Measurements and Effect of Added Chloride Ions-studies of Anodic Oxide Films Formed on Titanium in Electrolytes", *Journal of Electrochemical Society India*, Vol. 44, pp. 31-36, 1995.