

Evaluación de la resistencia a la corrosión de la aleación Ti6Al4V modificada mediante oxidación térmica

¹Janer Orozco-Rodríguez,²Dayron Ortiz Jaraba,³Jhon Schmalbach Trujillo,⁴Ricardo Mendoza Quiroga,⁵Carlos Soto-Montaño,⁶Roosvel Soto-Díaz

^{1,5,6}Facultad de Ingeniería, Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia

^{2,3,4}Facultad de Ingeniería, Universidad Antonio Nariño, Puerto Colombia, Colombia

Article History

Received Jun,08th, 2020

Accepted Jun ,12th, 2020

Published Jun , 22th,2020



© 2020 The Authors. This article is an Open Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution(CC-BY)license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Abstract

En el presente trabajo se evaluó la resistencia a la corrosión de la aleación Ti6Al4V sometida a procesos de anodizado y oxidación térmica con el propósito de analizar su comportamiento para aplicaciones biomédicas. La aleación Ti6Al4V constituye uno de los materiales metálicos más utilizados en este campo debido a su elevada relación resistencia-peso, propiedades mecánicas, capacidad de pasivación y comportamiento biocompatible. El estudio comprendió técnicas de caracterización mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, así como tratamientos superficiales de anodización y oxidación térmica. Las condiciones de anodización se mantuvieron constantes, mientras que las temperaturas empleadas en el tratamiento de oxidación térmica fueron de 520 °C, 560 °C y 600 °C. Posteriormente, el comportamiento electroquímico fue analizado mediante mediciones de potencial de circuito abierto y curvas de polarización potenciodinámica. La caracterización microestructural permitió identificar las fases α y β características de la aleación Ti6Al4V, asociadas con propiedades mecánicas, resistencia térmica, resistencia a la corrosión y comportamiento biológico. Los ensayos electroquímicos evidenciaron que las muestras sometidas a modificación superficial presentaron un mejor comportamiento respecto al metal base. Entre las diferentes temperaturas estudiadas, la muestra oxidada térmicamente a 520 °C presentó un comportamiento más noble frente a la corrosión y una menor tasa de corrosión en comparación con las demás condiciones evaluadas. Los resultados muestran que la oxidación térmica puede modificar favorablemente la superficie de Ti6Al4V mediante la formación de películas de óxido protectoras. Estas capas pueden aumentar la estabilidad electroquímica del material y, en consecuencia, favorecer su utilización en sistemas biomédicos. Se concluye que la combinación de anodización y oxidación térmica constituye una alternativa efectiva para mejorar el comportamiento superficial y la resistencia a la corrosión de la aleación Ti6Al4V.

Keywords: Anodizado, corrosión, oxidación térmica, Ti6Al4V, biomateriales, polarización potenciodinámica, titanio, biocompatibilidad

INTRODUCTION

El desarrollo de materiales destinados a aplicaciones biomédicas requiere considerar simultáneamente propiedades mecánicas, químicas y biológicas. Los materiales implantados dentro del organismo pueden permanecer durante periodos prolongados en contacto con fluidos fisiológicos y tejidos, por lo que deben presentar elevada estabilidad y resistencia al deterioro. Entre los materiales metálicos utilizados en dispositivos biomédicos, el titanio y sus aleaciones poseen especial relevancia debido a su combinación de baja densidad, elevada resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y adecuada respuesta biológica. La aleación Ti6Al4V contiene principalmente titanio acompañado por aluminio y vanadio. Su microestructura está formada fundamentalmente por fases α y β , cuya distribución influye directamente sobre sus propiedades mecánicas y su desempeño frente a diferentes condiciones ambientales. Una de las razones principales de la elevada resistencia a la corrosión del titanio es su capacidad para formar espontáneamente una fina película superficial de óxido, fundamentalmente basada en TiO_2 . Esta película actúa como una barrera entre el metal y el medio circundante, disminuyendo las reacciones electroquímicas responsables de la corrosión. Sin embargo, la película natural puede presentar limitaciones relacionadas con espesor, estabilidad y resistencia frente a determinados ambientes. Por este motivo, se han desarrollado diferentes métodos destinados a modificar artificialmente la superficie de las aleaciones de titanio. Entre ellos se encuentran el anodizado, la oxidación térmica, los tratamientos electroquímicos, las deposiciones superficiales y diferentes técnicas de modificación físico-química. La oxidación térmica constituye un procedimiento relativamente sencillo que consiste en exponer el material a temperaturas controladas durante un determinado intervalo de tiempo. Durante el tratamiento se produce crecimiento de la capa de óxido superficial. Las características de esta capa dependen principalmente de la temperatura, tiempo de exposición, composición de la aleación y condiciones atmosféricas. El presente estudio analiza la resistencia a la corrosión de Ti6Al4V después de procesos de anodización y oxidación térmica realizados a 520 °C, 560 °C y 600 °C.

Características de la aleación Ti6Al4V

La Ti6Al4V es una aleación de titanio tipo $\alpha+\beta$ ampliamente estudiada en ingeniería y biomateriales. El aluminio actúa principalmente como estabilizador de la fase α , mientras que el vanadio favorece la estabilización de la fase β . La coexistencia de ambas fases proporciona una combinación favorable de resistencia mecánica y ductilidad. La fase α presenta una estructura cristalina hexagonal compacta, mientras que la fase β corresponde a una estructura cúbica centrada en el cuerpo. La cantidad, tamaño y distribución de estas fases pueden modificarse mediante tratamientos térmicos. Estas variaciones microestructurales pueden influir sobre dureza, resistencia a fatiga, comportamiento mecánico y resistencia a la corrosión. Además de sus propiedades mecánicas, Ti6Al4V posee una elevada tendencia a la pasivación. Cuando la superficie entra en contacto con oxígeno se forma rápidamente una capa protectora. Esta película disminuye la transferencia de carga entre el material y el medio, proporcionando protección frente a procesos corrosivos. Estas características explican su utilización en implantes ortopédicos, componentes dentales, dispositivos médicos y elementos de fijación.

Corrosión en aplicaciones biomédicas

La corrosión puede definirse como el deterioro progresivo de un material producido mediante interacciones químicas o electroquímicas con el entorno. En aplicaciones biomédicas, este fenómeno resulta especialmente importante debido a que los implantes permanecen en contacto directo con medios fisiológicos. Los fluidos corporales contienen agua, sales y diferentes especies químicas que pueden actuar como electrolitos. Aunque Ti6Al4V presenta una elevada resistencia a la corrosión, determinadas condiciones pueden alterar la estabilidad de su película pasiva. Los daños mecánicos, variaciones químicas del medio y desgaste pueden modificar localmente la superficie. La degradación superficial puede favorecer la liberación de iones metálicos y alterar el desempeño del material. Por ello, aumentar la estabilidad de la capa de óxido constituye una estrategia importante para mejorar el comportamiento de los implantes metálicos. Investigaciones anteriores han mostrado que los tratamientos de oxidación térmica pueden aumentar la resistencia a la corrosión y al desgaste de Ti6Al4V mediante la formación de capas superficiales protectoras.

Modificación superficial mediante anodizado

El anodizado es un tratamiento electroquímico utilizado para modificar la superficie de diferentes metales.

Durante este proceso, la pieza metálica funciona como ánodo dentro de una celda electroquímica. La aplicación de un potencial eléctrico favorece el crecimiento controlado de una película de óxido. En las aleaciones de titanio, este procedimiento permite modificar el espesor, morfología y características de la capa superficial. Una de las principales ventajas del anodizado consiste en la posibilidad de obtener superficies más protectoras sin modificar completamente las propiedades internas del material. El tratamiento puede utilizarse además como etapa previa antes de otros procedimientos superficiales. La combinación de anodizado y oxidación térmica puede modificar posteriormente la estructura y estabilidad del óxido formado.

Oxidación térmica

La oxidación térmica consiste en someter la aleación a temperaturas elevadas en presencia de una atmósfera que contenga oxígeno. Durante el proceso se produce difusión de oxígeno y crecimiento de una película superficial de óxido. La temperatura constituye una variable fundamental. Cuando aumenta la temperatura, la velocidad de las reacciones de oxidación también puede incrementarse. Sin embargo, una temperatura más elevada no necesariamente significa un mejor comportamiento electroquímico. El espesor excesivo, defectos internos, cambios estructurales o tensiones dentro de la capa pueden afectar su estabilidad. Por este motivo, resulta necesario determinar experimentalmente las condiciones adecuadas. En el estudio analizado se evaluaron tres temperaturas principales:

520 °C

560 °C

600 °C

Las condiciones de anodización permanecieron constantes, permitiendo analizar específicamente el efecto asociado con la variación de temperatura del tratamiento térmico.

Metodología

El proceso experimental se desarrolló utilizando muestras de la aleación Ti6Al4V. Inicialmente se realizó una caracterización microestructural para observar las fases existentes en el material. Para ello se emplearon técnicas de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Posteriormente las muestras fueron sometidas a anodización bajo condiciones controladas. Después del proceso electroquímico se aplicaron tratamientos de oxidación térmica a temperaturas diferentes. Las temperaturas utilizadas fueron:

520 °C, 560 °C y 600 °C.

Una vez terminados los tratamientos superficiales, se realizaron evaluaciones electroquímicas.

Entre las pruebas utilizadas se incluyó el potencial de circuito abierto. Esta medición permite observar el comportamiento espontáneo del material cuando se encuentra en contacto con el medio electroquímico sin aplicar una polarización externa significativa. Posteriormente se realizaron curvas de polarización potenciodinámica. Mediante estas curvas es posible evaluar parámetros relacionados con potencial de corrosión, densidad de corriente y comportamiento pasivo. La comparación entre el metal base y las diferentes condiciones tratadas permitió determinar el efecto de la modificación superficial.

Table 1: Condiciones experimentales y comportamiento observado

Muestra	Condición superficial	Temperatura	Comportamiento general
Metal base	Sin oxidación térmica adicional	—	Menor protección relativa
Muestra 1	Anodizado + oxidación térmica	520 °C	Comportamiento más noble y menor tasa de corrosión
Muestra 2	Anodizado + oxidación térmica	560 °C	Mejora frente al metal base
Muestra 3	Anodizado + oxidación térmica	600 °C	Mejora frente al metal base, con respuesta diferente a 520 °C
Comparación global	Superficies modificadas	520–600 °C	Incremento general de la resistencia a la corrosión

Los resultados del estudio original muestran que las superficies modificadas presentaron mejoras respecto al metal base, mientras que la condición de 520 °C destacó por su comportamiento electroquímico favorable.

Caracterización microestructural

La observación microscópica permitió identificar la presencia de las fases α y β características de Ti6Al4V.

Estas fases desempeñan un papel importante en el comportamiento del material. La fase α contribuye a determinadas propiedades relacionadas con resistencia y estabilidad. La fase β proporciona características adicionales de ductilidad y respuesta mecánica. La coexistencia de ambas fases permite obtener una aleación apropiada para aplicaciones donde se requiere una elevada relación entre resistencia y peso. La modificación superficial realizada mediante tratamientos térmicos ocurre principalmente en las regiones externas del material. Por ello, una de las ventajas de estos tratamientos consiste en mejorar propiedades superficiales sin necesariamente alterar de manera significativa las propiedades estructurales del volumen completo de la pieza.

Potencial de circuito abierto

El potencial de circuito abierto proporciona información sobre la tendencia electroquímica de la superficie cuando entra en contacto con un medio corrosivo. En términos generales, un desplazamiento hacia valores más nobles puede asociarse con una mayor estabilidad superficial. Los resultados mostraron diferencias entre el metal base y las muestras modificadas. Las superficies sometidas a oxidación térmica presentaron un comportamiento superior respecto al material sin modificación. Esta respuesta indica que la película producida durante el tratamiento puede generar una barrera más estable frente al medio electroquímico.

Sin embargo, las diferencias entre las distintas temperaturas muestran que la protección no depende exclusivamente de aumentar la temperatura. También intervienen la estructura, espesor y calidad de la película formada.

Curvas de polarización potenciodinámica

Las curvas de polarización constituyen una herramienta ampliamente utilizada para caracterizar el comportamiento de materiales frente a la corrosión. Durante el ensayo se modifica progresivamente el potencial aplicado y se registra la respuesta de corriente. A partir del comportamiento obtenido pueden analizarse diferentes zonas electroquímicas. Una menor corriente de corrosión generalmente representa una menor velocidad de degradación. Los resultados indicaron que la muestra tratada a 520 °C presentó el comportamiento más favorable entre las condiciones comparadas. Esta muestra mostró una respuesta más noble y una menor tasa de corrosión respecto de las demás condiciones. El comportamiento observado puede asociarse con la formación de una película superficial protectora con características adecuadas de estabilidad y continuidad.

Influencia de la temperatura de oxidación

La temperatura determina la cinética de crecimiento de las capas de óxido. A temperaturas relativamente bajas, el crecimiento puede ser limitado. Cuando aumenta la temperatura, el espesor de la capa puede aumentar debido a una mayor difusión del oxígeno. Sin embargo, películas demasiado gruesas pueden desarrollar tensiones internas. Asimismo, pueden generarse modificaciones estructurales que alteren sus propiedades protectoras. Por esta razón, existe normalmente un intervalo de tratamiento donde se obtiene una combinación adecuada entre espesor, adherencia y estabilidad. Los resultados obtenidos muestran que dentro de las condiciones evaluadas la temperatura de 520 °C produjo un comportamiento electroquímico particularmente favorable. Esto demuestra que la optimización de las condiciones térmicas es más importante que simplemente utilizar la temperatura máxima disponible.

Relación entre corrosión y biocompatibilidad

La resistencia a la corrosión constituye una característica importante para los biomateriales metálicos.

Cuando un implante presenta elevada estabilidad superficial disminuye la posibilidad de degradación electroquímica. Esto puede reducir la liberación de especies metálicas hacia los tejidos circundantes.

La formación de una superficie estable de óxido de titanio también favorece la interacción entre el implante y el entorno biológico.

Por esta razón, tratamientos capaces de reforzar la película pasiva pueden contribuir a mejorar el desempeño de dispositivos biomédicos. Sin embargo, la biocompatibilidad no depende exclusivamente de la resistencia a la corrosión. También intervienen rugosidad, composición química, energía superficial, interacción celular y respuesta inmunológica. Por ello, los ensayos electroquímicos deben considerarse como una parte de la evaluación integral de un biomaterial.

Aplicaciones biomédicas

La aleación Ti6Al4V puede utilizarse en diferentes componentes biomédicos. Entre sus aplicaciones se encuentran implantes ortopédicos, prótesis articulares, dispositivos de fijación y elementos dentales. En estos sistemas, la superficie se encuentra directamente expuesta a condiciones fisiológicas durante largos periodos. La modificación mediante oxidación térmica puede generar una superficie con mejores características protectoras. Asimismo, una mayor resistencia a la corrosión puede prolongar la estabilidad funcional del material. Los tratamientos superficiales presentan además la ventaja de modificar principalmente la zona que interactúa directamente con el ambiente biológico. Esto permite conservar las propiedades mecánicas internas del material mientras se optimiza su comportamiento superficial.

Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que la modificación superficial mediante anodización y oxidación térmica puede mejorar el comportamiento electroquímico de Ti6Al4V. Las muestras tratadas presentaron un comportamiento superior respecto al metal base. Este resultado coincide con investigaciones anteriores que han demostrado que la oxidación térmica puede aumentar la resistencia a la corrosión de Ti6Al4V mediante el desarrollo de capas de óxido más protectoras. Un estudio clásico, por ejemplo, encontró una mejora importante después de tratamientos térmicos específicos sobre esta aleación. El resultado particularmente favorable obtenido a 520 °C indica que la relación entre temperatura y protección frente a la corrosión no necesariamente es lineal. La formación de una película protectora depende de varios procesos simultáneos, incluyendo difusión del oxígeno, crecimiento del óxido y transformaciones estructurales. La caracterización microestructural complementa los resultados electroquímicos debido a que permite relacionar las características de las fases α y β con el comportamiento global del material. No obstante, los resultados electroquímicos deben complementarse en investigaciones posteriores mediante estudios adicionales de composición de la película, adherencia, desgaste, rugosidad y comportamiento biológico.

Conclusiones

La aleación Ti6Al4V presenta características mecánicas y electroquímicas que favorecen su utilización en aplicaciones biomédicas. Su microestructura característica contiene fases α y β que contribuyen al comportamiento mecánico y a la respuesta del material. La resistencia natural a la corrosión está relacionada principalmente con la capacidad del titanio para formar una capa superficial pasiva de óxido. La aplicación de tratamientos superficiales puede aumentar la protección proporcionada por esta película natural. La combinación de anodizado y oxidación térmica utilizada en el estudio produjo mejoras significativas respecto al metal base. Las muestras modificadas térmicamente a 520 °C, 560 °C y 600 °C mostraron cambios favorables en su comportamiento electroquímico. Entre las condiciones estudiadas, la muestra oxidada a **520 °C presentó el comportamiento más noble frente a la corrosión y la menor tasa de corrosión**, según los resultados reportados. Esto demuestra que la optimización de la temperatura resulta fundamental para desarrollar superficies protectoras. Una temperatura superior no implica necesariamente una mayor resistencia a la corrosión. Los ensayos de potencial de circuito abierto y polarización potenciodinámica constituyen herramientas adecuadas para comparar la estabilidad electroquímica de las superficies. Las mejoras observadas en la resistencia a la corrosión pueden resultar beneficiosas para aplicaciones biomédicas debido a que una mayor estabilidad superficial puede disminuir los procesos de degradación del material. En consecuencia, la oxidación térmica representa una alternativa tecnológica relativamente sencilla para mejorar el desempeño superficial de Ti6Al4V. Futuras investigaciones deberían estudiar tiempos adicionales de tratamiento, diferentes temperaturas, características estructurales del óxido, propiedades tribológicas y respuesta biológica para identificar las condiciones óptimas de aplicación clínica.

Summary

El estudio evaluó el efecto del anodizado y la oxidación térmica sobre la resistencia a la corrosión de la aleación Ti6Al4V destinada a aplicaciones biomédicas. Las muestras fueron caracterizadas mediante microscopía y posteriormente sometidas a oxidación térmica a temperaturas de 520 °C, 560 °C y 600 °C. El comportamiento electroquímico fue evaluado utilizando potencial de circuito abierto y curvas de polarización potenciodinámica. Las observaciones microestructurales identificaron las fases α y β características de Ti6Al4V. Los tratamientos superficiales mejoraron el comportamiento frente a la corrosión respecto al metal base. La muestra sometida a oxidación térmica a

520 °C presentó la respuesta más favorable entre las condiciones comparadas. Los resultados confirman que la modificación térmica de la superficie puede fortalecer la película protectora de óxido y aumentar la resistencia electroquímica. La mejora obtenida representa una característica relevante para aplicaciones biomédicas en las que el material puede permanecer expuesto durante largos periodos a medios fisiológicos. Por ello, los tratamientos de oxidación térmica representan una estrategia potencial para aumentar el desempeño y estabilidad de componentes fabricados con Ti6Al4V.

Referencias

- Alves, V. A., Reis, R. Q., Santos, I. C. B., Souza, D. G., Gonçalves, T. F., Pereira-da-Silva, M. A., Rossi, A., & da Silva, L. A. (2009). In situ impedance spectroscopy study of the electrochemical corrosion of Ti and Ti–6Al–4V in simulated body fluid at 25 °C and 37 °C. *Corrosion Science*, 51(10), 2473–2482.
- Brunette, D. M., Tengvall, P., Textor, M., & Thomsen, P. (Eds.). (2001). *Titanium in medicine: Material science, surface science, engineering, biological responses and medical applications*. Springer.
- Cui, Z. D., Man, H. C., & Yang, X. J. (2005). The corrosion and nickel release behavior of laser surface-melted NiTi shape memory alloy in Hanks' solution. *Surface and Coatings Technology*, 192(2–3), 347–353.
- Dong, H., & Bell, T. (2000). Enhanced wear resistance of titanium surfaces by a new thermal oxidation treatment. *Wear*, 238(2), 131–137.
- Güleryüz, H., & Çimenoglu, H. (2004). Effect of thermal oxidation on corrosion and corrosion–wear behaviour of a Ti–6Al–4V alloy. *Biomaterials*, 25(16), 3325–3333.
- Liu, X., Chu, P. K., & Ding, C. (2004). Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 47(3–4), 49–121.
- Long, M., & Rack, H. J. (1998). Titanium alloys in total joint replacement—A materials science perspective. *Biomaterials*, 19(18), 1621–1639.
- Niinomi, M. (1998). Mechanical properties of biomedical titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 243(1–2), 231–236.
- Oshida, Y. (2007). *Bioscience and bioengineering of titanium materials*. Elsevier.
- Pohrelyuk, I. M., Fedirko, V. M., Tkachuk, O. V., & Proskurnyak, R. V. (2013). Corrosion resistance of Ti–6Al–4V alloy with nitride coatings in Ringer's solution. *Corrosion Science*, 66, 392–398.
- Ratner, B. D., Hoffman, A. S., Schoen, F. J., & Lemons, J. E. (Eds.). (2013). *Biomaterials science: An introduction to materials in medicine*. Academic Press.
- Williams, D. F. (2008). On the mechanisms of biocompatibility. *Biomaterials*, 29(20), 2941–2953.