

Ingeniería de superficies en Titanio: La borurización

Surface engineering in Titanium: Boriding

German A. Rodríguez Castro ^a, Gabriel A. Gutiérrez Rebolledo ^b, Juan V. Méndez Méndez ^c,
Israel Arzate Vázquez ^d

Abstract:

This paper offers a comprehensive review of titanium and its alloys, highlighting their key properties and wide-ranging applications in engineering. Recognizing the titanium's wear resistance limitation, it examines surface enhancement techniques, focusing on boriding. The boriding process, its various methods, and the properties of the resulting titanium boride phases (TiB₂ and TiB) are described. Tribological studies demonstrate the significant improvement in wear resistance achieved by boriding titanium. The potential applications of titanium borides in automotive, aerospace, biomedical, armor, and industrial fields are explored, emphasizing the advantageous combination of high surface hardness and titanium's inherent attributes. Finally, the challenges to industrial adoption, including brittleness and cost, are discussed, concluding with a view of borided titanium as a specialized, high-performance solution.

Keywords:

Titanium, boriding, wear, diffusion, hardness

Resumen:

Este manuscrito examina exhaustivamente el titanio y sus aleaciones, resaltando sus propiedades esenciales y su extenso uso en ingeniería. La limitada resistencia al desgaste del titanio impulsa la investigación de técnicas de mejora superficial, con foco en la boruración. Se describe el proceso de boruración, sus métodos y las características de las fases de boruro de titanio (TiB₂ y TiB). Estudios tribológicos evidencian la mejora significativa en la resistencia al desgaste del titanio borurado. Se exploran aplicaciones potenciales en automoción, aeroespacial, biomedicina, blindaje e industria, destacando la sinergia entre la alta dureza superficial y las propiedades inherentes del titanio. Finalmente, se abordan los desafíos para su adopción industrial, como fragilidad y costo, concluyendo con una visión del titanio borurado como solución especializada de alto rendimiento.

Palabras Clave:

Titanio, borurización, desgaste, difusión, dureza

INTRODUCCIÓN

William Gregor en Inglaterra, en el año de 1791, descubrió un nuevo elemento a partir de un compuesto de óxido natural denominado ilmenita. Martin Heinrich Klaproth nombró al elemento como Titanio por una

analogía de la mitología griega sobre los titanes que fueron capturados en la corteza terrestre y la dificultad de extracción del elemento; en 1795, logró separar el hierro de la ilmenita obteniendo otro óxido natural llamado rutilo. Matthew Albert Hunter, en 1910, pudo aislar el metal del rutilo; posteriormente Wilhelm Justin Kroll desarrolló un

^a Autor de Correspondencia, Instituto Politécnico Nacional | Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Zacatenco | Ciudad de México | México, <https://orcid.org/0000-0001-5108-5161>, Email: garodriguezc@ipn.mx

^b Instituto Politécnico Nacional | Escuela Nacional de Ciencias Biológicas | Ciudad de México | México, <https://orcid.org/0000-0002-2189-7908>, Email: ggutierrezr@ipn.mx

^c Instituto Politécnico Nacional de México | Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías | Ciudad de México | México, <https://orcid.org/0000-0002-1227-8072>, Email: jmendezm@ipn.mx

^d Instituto Politécnico Nacional de México | Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías | Ciudad de México | México, <https://orcid.org/0000-0002-9220-2405>, Email: iarzate@ipn.mx

método para obtener el titanio, convirtiéndose en “el padre de la industria del titanio” (Peters et al., 2023). El titanio es un material no ferroso, de los más ligeros (4.54 g/cm³) y bastos de la corteza terrestre con el 0.61% detrás del aluminio (Al), hierro (Fe) y magnesio (Mg) con el 8.2, 5.2 y 2.4%, respectivamente. La ingeniería se ha beneficiado enormemente del titanio y sus aleaciones, materiales que se destacan por elevada resistencia, ligereza, gran resistencia a la corrosión y biocompatibilidad, haciéndolos cruciales en industrias tan diversas como la aeroespacial, la automotriz y la biomédica. Sin embargo, el titanio tiende a desgastarse con facilidad cuando se somete a fricción con otros materiales y a adherirse a otras superficies metálicas, lo que puede causar agarrotamiento o soldadura en frío.

Las técnicas de ingeniería de superficies que pueden aplicarse con diferente grado de éxito a las aleaciones de titanio para combatir su baja resistencia al desgaste; la borurización es una de estas alternativas transformando radicalmente su superficie. La capa cerámica resultante posee una dureza varias veces superior a la del sustrato, lo que le confiere una excepcional resistencia al desgaste adhesivo y abrasivo, reducción del coeficiente de fricción y protección contra la corrosión y oxidación bajo ambientes específicos.

Aleaciones de titanio

El titanio es un material que posee la propiedad de cambiar su estructura cristalina dentro de un rango. En la Figura 1 se muestran las dos estructuras cristalinas del titanio: la hexagonal compacta (hcp) denominada como fase α y la cubica centrada en el cuerpo (bcc) nombrada como fase β . La transformación de titanio α a β se produce a la temperatura β transus (882 ± 2 °C). Estas fases tienen gran importancia en el desempeño de las aleaciones de titanio afectando la resistencia a la deformación plástica, el decremento a la ductilidad, aumento de la fluencia, etc., véase Tabla 1 (Leyens y Peters, 2003).

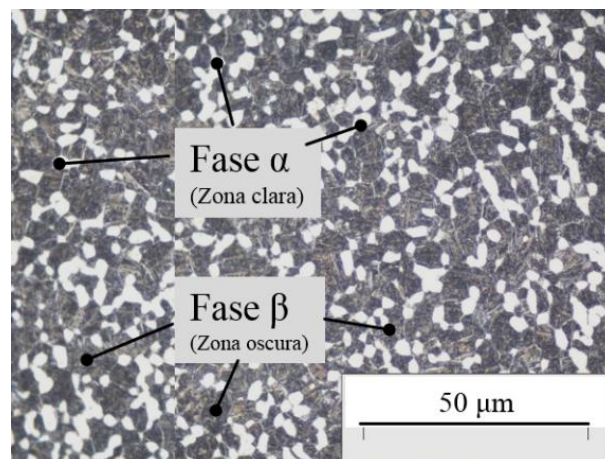


Figura 1. Estructura bimodal de la aleación Ti_6Al_4V . Fuente: Elaboración propia.

La incorporación de otros átomos en la estructura cristalina del titanio brinda una combinación de propiedades físicas como mecánicas dando lugar a una variedad de aleaciones. Estas aleaciones se clasifican en cinco tipos, siendo solo tres las más importantes: aleaciones α , $\alpha+\beta$ y β . Véase Tabla 1 (Najafzadeh et al., 2024).

Tabla 1. Propiedades de los tres principales tipos de aleación de Ti. Fuente: Elaboración propia.

	α	$\alpha+\beta$	β
Densidad	+	+	-
Resistencia	-	+	++
Ductilidad	-/+	+	+/-
Tenacidad a la fractura	+	-/+	+/-
Resistencia a la fluencia	+	+/-	-
Comportamiento a la corrosión	+	+	+/-
Comportamiento a la oxidación	++	+/-	-
Soldabilidad	+	+/-	-
Formado en frío	--	-	-/+

Aleaciones α

La industria petroquímica utiliza ampliamente estas aleaciones debido a su excepcional resistencia a la corrosión. Este grado contiene dos tipos de aleaciones:

- 1) Titanio sin alear con una pequeña cantidad de O y Fe.
- 2) Adición de un factor estabilizador α , como Al o Sn para mejorar la resistencia. Los sistemas binarios Ti-O y ternarios $\text{Ti}_5\text{Al}_{2.5}\text{Sn}$ se encuentran entre las aleaciones α .

La aleación de titanio más común es el titanio comercialmente puro (CP Ti). Los límites elásticos del CP Ti varían según la pureza, que oscila entre 170 y 480 MPa, y pueden utilizarse en aplicaciones no estructurales (Boyer, 1996).

Aleaciones cercanas a α

Gracias a su buena forjabilidad, las aleaciones de Ti cercanas a α son una elección frecuente para fabricar componentes de compresor en turbina de gas, así como piezas rotatorias en motores de aviación: alabes, discos y anillos. La aleación Ti6242S es la más representativa y utilizada en este grupo, valorada especialmente por su alta resistencia a la fluencia y su excelente estabilidad mecánica a temperaturas elevadas. Dentro de esta misma categoría, también se emplean comúnmente las aleaciones Ti-829 y Ti-834.

Aleaciones $\alpha + \beta$

La aleación $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ conocida como una aleación $\alpha + \beta$, es la más importante de su tipo, constituyendo cerca del 40% del tonelaje anual de Ti. Su éxito radica en que, a temperatura ambiente, los elementos de aleación logran un equilibrio: estabiliza y refuerza la fase α mientras retienen una parte considerable de la fase β (Jackson y Dring, 2006). Existen otras aleaciones en esta categoría, como la Ti6246, que incrementan la proporción de estabilizadores de la fase β . La microestructura resultante de $\alpha + \beta$ permite una amplia gama de aplicaciones, que van desde componentes aeroespaciales como discos y aspas de ventiladores hasta uso biomédicos en implantes de reemplazo articular (Boyer, 1996; Long y Rack, 1998).

Aleaciones cercanas a β y metaestables β

Las aleaciones de titanio de clase β se formulan con una alta cantidad de elementos estabilizadores de esta fase, permitiendo que la estructura β se conserve después del temple. Estas aleaciones se utilizan para trabajo en caliente pero aun inferiores a las utilizadas en las

aleaciones $\alpha + \beta$. Además, esta fase puede experimentar un endurecimiento considerable mediante la precipitación de partículas finas (Zhecheva et al., 2005). Como resultado de estas características, se obtienen aleaciones de muy alta resistencia ampliamente utilizadas en la industria aeroespacial para sistemas de trenes de aterrizaje. Es importante notar, que dentro del vasto rango de propiedades mecánicas de las aleaciones de Ti, las aleaciones β y cercanas a β pueden alcanzar resistencias a la tracción comparables a los aceros, a diferencia de las cercanas a α , optimizadas para mejorar la termofluencia.

¿Qué es la borurización?

La borurización es un tratamiento termoquímico que difunde átomos de boro en el titanio y sus aleaciones que al reaccionar químicamente con el sustrato (Ti) forman una capa de boruros de titanio altamente dura (TiB_2 y TiB), véase Figura 2. Este proceso se lleva a cabo a temperaturas altas, regularmente entre 800 y 1100 °C en una mufla en donde el titanio o su aleación se encuentra embebida en un medio rico en boro, ya sea en polvo o pasta.

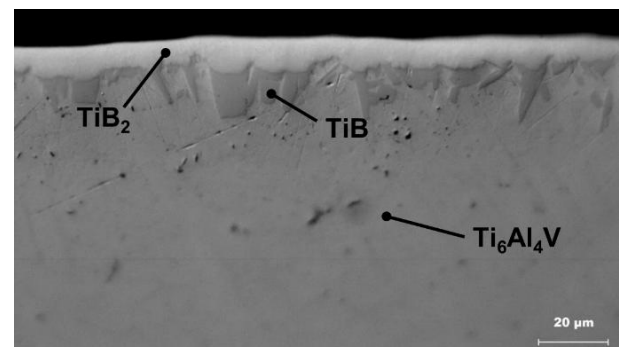


Figura 2. Boruros de Ti formados en la aleación $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$.
Fuente: Elaboración propia.

Métodos para borurar titanio

Existen distintos procesos para formar boruros de titanio. Los tres más importantes son:

- 1) El "Plasma-assisted" consiste en introducir un gas que contiene boro o un precursor de boro (BCl_3 , B_2H_6 , o incluso un polvo o pasta que contiene boro) en una cámara de vacío. Se aplica un campo eléctrico para ionizar el gas, creando un plasma. Este plasma contiene iones, electrones y especies neutras altamente reactivas. Los iones energéticos del plasma bombardean la superficie del titanio calentando la superficie del titanio y

favoreciendo la difusión de B y por consecuencia la formación de boruros de Ti (Makuch et al., 2017).

2) "Fluidized bed" que consiste en un reactor de lecho fluidizado donde se utiliza un fluido compuesto de óxido de aluminio (AlO), carburo de boro (B_4C) y cloruro de sodio (NaCl) o amonio de fluoruro (NH_4F) o cloro (Cl) y gas argón (Ar). Las piezas de Ti se suspenden dentro del lecho asegurando un contacto constante con las partículas. El calor activa la descomposición del polvo borurante en la superficie del Ti provocando que el boro difunda y reaccione con el sustrato para formar boruros de Ti (Anthymidis et al., 2001).

3) "Solid-state diffusion", consiste en la introducción de boro en la superficie de Ti mediante contacto con una fuente sólida rica en boro (polvo o pasta). Este conjunto se calienta a altas temperaturas (700-1000°C) en una mufla, permitiendo que los átomos de boro se difundan a través de la superficie del titanio en estado sólido. Durante la difusión, el boro reacciona con el titanio, formando capas duras de boruros de titanio (TiB y TiB_2).

Propiedades fisicoquímicas y mecánicas de las fases TiB_2 y TiB

El diboruro de titanio (TiB_2) forma una capa superficial densa y continua, a menudo descrita en la literatura como monolítica, con una estructura cristalina hexagonal. Presenta una dureza considerable, que oscila entre 2700 y 3500 HV, una densidad de 4.56 g/cm³, un módulo de elasticidad de 550 GPa y un coeficiente de expansión térmica de $8.1 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ (Atar et al., 2008; Peng et al., 2018). En contraste, el boruro de titanio (TiB) exhibe una morfología acicular o de tipo "whisker" y posee una estructura cristalina ortorrómbica. Este material cerámico tiene una dureza que varía de 1897 a 1937 HV, una densidad de 4.57 g/cm³, un módulo de Young de 400 GPa, una resistencia a la tensión de 8 GPa y un coeficiente de expansión térmica de $8.5 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ (Duan et al., 2020). Estructuras cristalinas mostradas en Figura 3.

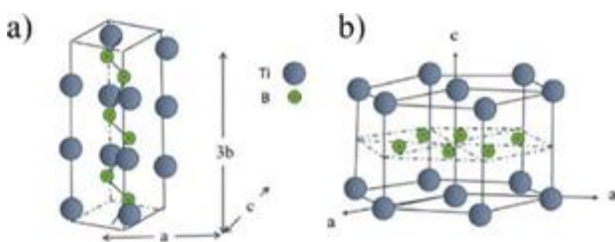


Figura 3. Estructuras cristalinas del a) TiB y b) TiB_2 . Fuente: Elaboración propia.

Resistencia al desgaste de boruros de titanio

Chen et al. (2021) observaron una notable mejora en las propiedades tribológicas del titanio puro después de la boruración, con una transición de la deformación plástica severa y abrasión a formas de desgaste más leves en las muestras boruradas. Las huellas de desgaste presentan una profundidad promedio de 58 μm y un ancho de 1240 μm ; mientras para las boruradas a 1150 $^{\circ}C$ mostraron profundidades y anchos de desgaste reducidos, alcanzando 3.02 y 400 μm , respectivamente. Además, el tratamiento influyó en el ruido fricativo o por frotamiento, que promediaron 99.1 dB para el titanio no tratado y variaron entre 94.1 dB y 88.9 dB para las muestras boruradas, lo que sugiere una relación entre los parámetros de boruración. Por su parte Wu et al. (2023) determinaron mediante pruebas de desgaste recíprocante lineal que los mecanismos predominantes en la capa de boruros en la aleación Ti-5Al-2.5Sn borurada a 1075 $^{\circ}C$ durante 20 h (dureza alcanzada 3533 HV) son el desgaste adhesivo acompañado de desgaste abrasivo. La tasa de desgaste de las muestras boruradas bajo cargas de 10 y 50 N fueron de 5.45 y 5.91 mm³/Nm, respectivamente. Zhu et al. (2021) realizaron pruebas de desgaste recíprocante lineal y perno sobre disco en capas de boruro de titanio formadas sobre la aleación de titanio TC21-DT, utilizando dos materiales de contraparte: bolas de acero GCr15 y bolas de cerámica de alúmina.

Los resultados revelaron que las muestras boruradas con adiciones de tierras raras (REs) exhibieron un coeficiente de fricción (COF) reducido entre 0.16-0.35 en comparación con la aleación TC21-DT sin tratar con 0.65. Además, el estudio observó que el tamaño de los whiskers TiB influyó significativamente en el comportamiento tribológico; un tamaño de TiB whisker más pequeño, cercano a la escala submicrónica (alrededor de 0.6 μm), condujo a una mejora adicional en la resistencia al desgaste, con una reducción del volumen de desgaste entre 10-30% en comparación con las capas de boruro con whiskers de TiB de mayor tamaño. Duan et al. (2020) realizaron pruebas de fricción recíprocante en seco para evaluar las propiedades de desgaste del titanio puro (Cp-Ti) borurado, y los resultados indicaron que la borurización influye significativamente en el comportamiento tribológico del material.

El titanio puro exhibió un coeficiente de fricción de 0.432, mientras que las muestras boruradas mostraron valores más bajos, hasta 0.284 para la sometida a 920 $^{\circ}C$ durante 20 h. Además, la pérdida de masa relativa fue menor en las muestras boruradas. El análisis del mecanismo de desgaste reveló una transición del desgaste adhesivo en el titanio puro al desgaste abrasivo en las muestras boruradas.

Resumiendo, la elevada dureza se traduce directamente en una mejora sustancial de la resistencia a diversos mecanismos de desgaste, incluyendo el desgaste abrasivo, adhesivo, erosivo y por fatiga superficial. Estudios, como los anteriores, reportan reducciones significativas en la tasa de desgaste. Además, se han reportado reducciones en el coeficiente de fricción en algunas condiciones, aunque otros estudios sugieren que puede aumentar debido a cambios en la rugosidad o mecanismos de desgaste. Una ventaja importante es la capacidad de la capa borurada para retener su alta dureza a temperaturas elevadas, lo que la hace atractiva para aplicaciones con desgaste a alta temperatura.

Aplicaciones potenciales de los boruros de titanio

El principal impulsor para considerar el uso de titanio borurado en aplicaciones industriales es la drástica mejora en la dureza superficial y, consecuentemente, en la resistencia a diversas formas de desgaste. Esto abre la posibilidad de reemplazar materiales más pesados como aceros endurecidos o recubrimientos menos resistentes al desgaste, aprovechando al mismo tiempo las otras ventajas del titanio. Una ventaja adicional significativa es la capacidad de las capas boruradas para retener su alta dureza a temperaturas elevadas. La mejora en la resistencia al desgaste abre un abanico de posibilidades en diversos sectores.

1. Componentes de Motores (Automoción/Aeroespacial): El titanio ya se utiliza en motores por su baja masa inercial. La borurización podría mejorar drásticamente la durabilidad de componentes como válvulas, asientos de válvula, guías de válvula, balancines, pasadores de pistón, e incluso segmentos de pistón o componentes en las secciones calientes de turbinas (álabes, sellos) que están sujetos a desgaste por fricción, erosión por partículas o fretting a altas temperaturas con el objetivo de extender la vida útil, aumentar la fiabilidad y potencialmente permitir condiciones de operación más severas.

2) Implantes médicos. Una de las aplicaciones potenciales de mayor impacto es en las superficies articulares de los reemplazos de cadera y rodilla. Las prótesis suelen fallar por desgaste al articular el polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) contra la cabeza femoral (en cadera) o con el componente femoral (en rodilla), que suelen ser de aleación de Co-Cr o Ti₆Al₄V. Las partículas de desgaste de polietileno generadas pueden desencadenar una respuesta biológica adversa (osteólisis) que conduce al aflojamiento del implante y la necesidad de cirugía de revisión,

especialmente en pacientes más jóvenes y activos (Gil, et al., 2002). La aplicación de una capa de boruro de titanio extremadamente dura y lisa sobre el componente metálico podría reducir drásticamente la tasa de desgaste del polietileno traduciéndose en una mayor longevidad del implante, retrasando o evitando la necesidad de revisiones. Esta solución competiría o complementaría a las estrategias actuales para reducir el desgaste, como el uso de cabezas femorales de cerámica (Al₂O₃, ZrO₂) o polietilenos altamente entrecruzados (cross-linked). Sin embargo, es crucial validar exhaustivamente la biocompatibilidad a largo plazo de la propia capa de boruro y evaluar los efectos de cualquier posible partícula de boruro que pudiera generarse por desgaste. Estudios preliminares en soluciones fisiológicas simuladas muestran un comportamiento pasivo de los boruros de titanio, pero se necesita más investigación in vivo (Kaplan & Işitan, 2018).

3) Componentes Aeroespaciales. Existen otras partes en aeronaves y naves espaciales donde la durabilidad superficial es crítica y el titanio borurado podría ofrecer ventajas. Ejemplos incluyen componentes de actuadores, superficies en contacto en uniones atornilladas o remachadas susceptibles al desgaste por fretting, componentes expuestos a ambientes erosivos (ingreso de polvo o partículas a alta velocidad en helicópteros o aviones operando en pistas no adecuadas), y partes del tren de aterrizaje sujetas a abrasión.

4) Blindaje. La alta dureza y bajo peso del TiB₂ lo hacen interesante para aplicaciones de blindaje balístico, lo que sugiere un potencial para el titanio borurado en estructuras protectoras ligeras en aplicaciones militares o aeroespaciales.

5) Componentes industriales. La combinación de extrema dureza, resistencia al desgaste y, en algunos casos, bajo coeficiente de fricción, hace al titanio borurado atractivo para una amplia gama de componentes industriales sometidos a condiciones severas, por ejemplo, componentes de moldes de inyección, sellos mecánicos, cojinetes y engranes ligeros, herramientas y componentes para la industria minera, agricultura y, petróleo y gas.

Debido a su costo y fragilidad inherente, es menos probable que se convierta en un reemplazo de propósito general para otros tratamientos o materiales, sino más bien una solución especializada para nichos de alto rendimiento.

Retos

La adopción industrial a gran escala del titanio borurado enfrenta desafíos importantes. El principal obstáculo técnico es la fragilidad inherente de la capa cerámica de boruro (incluida su rugosidad superficial), que puede comprometer la integridad del componente bajo ciertas condiciones de carga (impacto, flexión) y reducir la ductilidad y la resistencia a la fatiga del material base. Además, los altos costos asociados tanto al material de titanio como al proceso de boruración, la complejidad del control del proceso (formación de TiO_2 por pasivación), las altas temperaturas requeridas que pueden afectar al sustrato y causar distorsiones, y la menor madurez comercial en comparación con otros tratamientos superficiales, son barreras significativas. Los retos que se deben de considerar para la aplicación de los boruros de titanio comprenden:

Optimizar el proceso mediante métodos de borurización más eficientes, rápidos y controlables operando a temperaturas más bajas y tiempos cortos para minimizar el impacto térmico y la distorsión.

Controlar mejor la formación de las capas de TiB_2 y TiB , optimizando su proporción, morfología (especialmente la de los whiskers de TiB) y espesor para lograr un equilibrio óptimo entre dureza, resistencia al desgaste y tenacidad. Explorar la aplicación del borurado en nuevas aleaciones de titanio o la adición de otros elementos durante la boruración (implementación de tierras raras) para modificar y mejorar las propiedades de la capa borurada, la cinética de crecimiento, etc.

Realización de pruebas exhaustivas de rendimiento a largo plazo en condiciones de servicio simuladas, principalmente para aplicaciones biomédicas, estudios detallados de biocompatibilidad y comportamiento a la corrosión en vivo.

Conclusiones

Si la investigación y el desarrollo optimizan el proceso y la reducción de costos del proceso, entonces, el titanio borurado podría consolidarse como una solución valiosa para aplicaciones de alto rendimiento donde la combinación de extrema resistencia al desgaste y las excelentes propiedades de volumen del titanio (ligereza, resistencia a la corrosión, biocompatibilidad) ofrezcan una ventaja competitiva decisiva. Su nicho probablemente permanecerá en sectores de alto valor donde el rendimiento justifica la inversión, pero con avances continuos, su aplicabilidad podría expandirse gradualmente.

Referencias

- Anthymidis, K. G., Tsipas, D. N., & Stergioudis, E. (2001). Boriding of titanium alloys in a fluidized bed reactor. *Material letters*, 51 (2), 156-160.
- Atar, E., Kayali, E. S., & Cimenoglu, H. (2008). Characteristics and wear performance of borided Ti6Al4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, 202, 4583-4590.
- Boyer, R. R. (1996). An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering: A*, 213, 103-114.
- Chen, T., Koyama, S., & Yu, L. (2021). Improvement of Mechanical, Tribological, and Friction Reduction Properties of Pure Titanium by Boriding. *Applied Sciences*, 11, 4862.
- Duan, Y., Wang, X., Liu, D., Bao, W., Li, P., & Peng, M. (2020). Characteristics, wear and corrosion properties of borided pure titanium by pack boriding near $\alpha \rightarrow \beta$ phase transition temperature. *Ceramics International*, 46, 16380-16387.
- Gil, F. J., Crespo, A., Manero Planella, J. M., Rodríguez Rius, D., & Planell Estany, J. A. (2002). Mejora de la resistencia al desgaste de titanio y sus aleaciones utilizados para prótesis articulares. *Biomecánica*. <https://doi.org/10.5821/sibb.v10i2.1674>
- Jackson, M., & Dring, K. (2006). A review of advances in processing and metallurgy of titanium alloys. *Materials Science and Technology*, 22, 881-887.
- Kaplan, Y., & Işitan, A. (2018). Tribological Behavior of Borided Ti6Al4V Alloy under Simulated Body Fluid Conditions. *Acta Physica Polonica A*, 134, 271-274.
- Leyens, C., & Peters, M. (Eds.). (2003). *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Weinheim : Chichester.
- Long, M., & Rack, H. J. (1998). Titanium alloys in total joint replacement—A materials science perspective. *Biomaterials*, 19, 1621-1639.
- Makuch, N., Kulka, M., Keddam, M., Taktak, S., Ataibis, V., & Dziarski, P. (2017). Growth kinetics and some mechanical properties of two-phase boride layers produced on commercially pure titanium during plasma paste boriding. *Thin Solid Films*, 626, 25-37.
- Najafizadeh, M., Yazdi, S., Bozorg, M., Ghasempour-Mouziraji, Mehran., Hosseinzadeh, M., Zarrabian, M., & Cavaliere, P. (2024). Classification and applications of titanium and its alloys: A review. *Journal of Alloys and Compounds Communications*, 3, 100019.
- Peng, M.-J., Duan, Y.-H., Ma, L.-S., & Shu, B.-P. (2018). Characteristics of surface layers on Ti6Al4V alloy borided with CeO_2 near the transition temperature. *Journal of Alloys and Compounds*, 769, 1-9.
- Peters, M., Hemptnermacher, J., Kumpfert, J., & Leyens, C. (2003). Structure and Properties of Titanium and Titanium Alloys. En *Titanium and Titanium Alloys* (pp. 1-36). John Wiley & Sons, Ltd.
- Wu, Y., Lu, Y., Duan, Y., Zhou, X., Peng, M., Wang, X., & Zheng, S. (2023). Microstructure and wear properties of powder-pack borided Ti-5Al-2.5Sn alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 4032-4043.
- Zhecheva, A., Sha, W., Malinov, S., & Long, A. (2005). Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and

other surface engineering methods. *Surface and Coatings Technology*, 200, 2192-2207.

Zhu, Y. S., Liu, Y. F., Wei, X. N., Sun, D., Lu, W. Z., & Ko, T. J. (2021). Tribological characteristics of the dual titanium boride layers (TiB₂+TiB) on titanium alloy. *Ceramics International*, 47, 13957-13969.