

Tratamientos superficiales y su impacto en las tecnologías actuales

Samuel Hernández Montiel¹ y Leandro García González^{1*}

¹ Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología, Universidad Veracruzana

* Dirección para correspondencia: leagarcia@uv.mx

Desde el incierto descubrimiento del fuego hasta los actuales avances en nanotecnología (materiales con dimensiones de 10^{-9} m), la humanidad ha tenido muy claro que el desarrollo de la ciencia tiene como finalidad la mejora de la calidad de vida. Las nuevas tecnologías, por ejemplo, se han enfocado principalmente en áreas como la energía, la inteligencia artificial, la robótica, la medicina y la tecnología cuántica, entre otras (Sánchez Flores, 2025). No cabe duda de que, para la gran mayoría de estas ciencias, el uso de materiales de la más alta gama es uno de los factores más importantes para su desarrollo y crecimiento. El secreto de su calidad reside en las innovadoras técnicas de fabricación, en su estudio y perfeccionamiento, y finalmente, en su alta efectividad. Existen técnicas de fabricación que se enfocan únicamente en la mejora superficial; es decir, su función principal es mejorar un material ya existente mediante una nueva superficie. Dependiendo de su tamaño o contextura, estos materiales suelen llamarse capas, películas delgadas o simplemente recubrimientos. Su función principal es proteger y mejorar las propiedades del material cubierto, el cual se denomina sustrato o material base.

La obtención de un recubrimiento se basa en procesos donde los materiales interactúan con el sustrato a macro o microescala, mediante mecanismos biológicos, químicos o físicos. Estos procesos de interacción se pueden controlar con gran precisión, por lo que incluso es posible manipular directa o indirectamente los átomos de los materiales que conforman el recubrimiento. Tal es el grado de control que, literalmente, los átomos se pueden acomodar en el interior del recubrimiento como si de bolas adhesivas se tratara. El ordenamiento llega a ser tan alto que, dependiendo del proceso de fabricación y de las condiciones de trabajo utilizadas, cantidades enormes de átomos y moléculas se unen entre sí, dando como resultado estructuras con formas geométricas poco comunes y llamativas a la vista. Por lo regular, las estructuras se restringen a un tamaño nanométrico (la millonésima parte de un milímetro) y para poder visualizarlas es necesario el uso de un microscopio electrónico. Cuando estas nanoestructuras se encuentran en el recubrimiento, se habla de un nanomaterial, el cual, a su vez, puede estar constituido por uno o más elementos químicos. De acuerdo con varios estudios, los nanomateriales son capaces de poseer propiedades similares o superiores a las de los materiales de tamaño estándar, precisamente debido a su tamaño y al acomodo de las nanoestructuras (Corpus Mendoza *et al.*, 2023). Por lo tanto, en los recubrimientos o en películas delgadas, podemos aprovechar significativamente todos sus beneficios. Para una mejor apreciación, en la Figura 1 se muestran algunos tipos de nanomateriales y nanoestructuras.

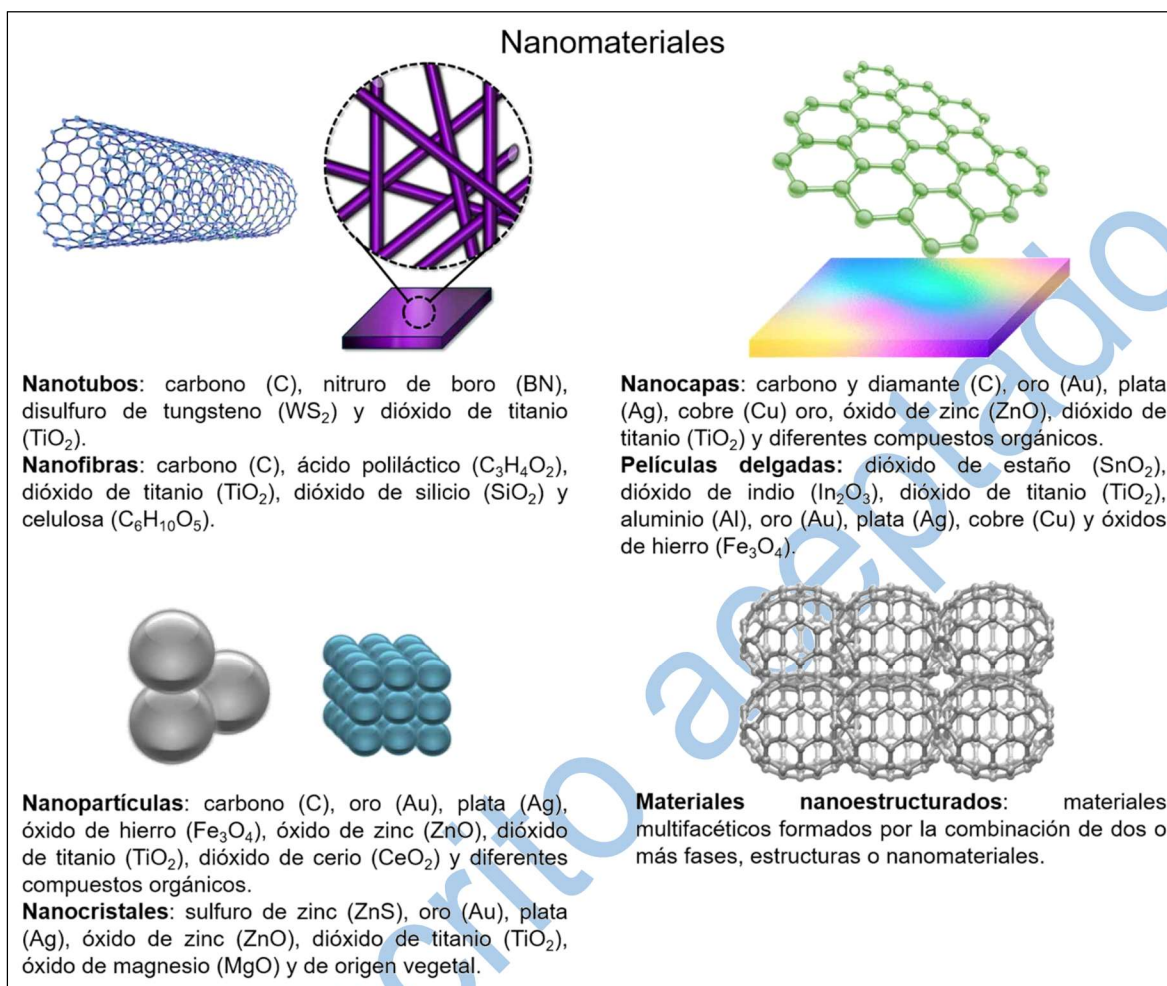


Figura 1. Tipos de nanomateriales más comunes.

Existe una gran variedad de técnicas de fabricación de recubrimientos, y la elección de la más adecuada dependerá de la practicidad o de la aplicación a la que vaya destinado el nanomaterial. En este trabajo en particular, se hablará de dos técnicas de modificación superficial muy utilizadas en la actualidad. La principal característica de ambas es que son altamente eficientes en la obtención de nanomateriales, los cuales, como se mencionó anteriormente, son capaces de

mejorar las propiedades de un material base. Las metodologías son conocidas como: anodizado electroquímico y erosión catódica o sputtering.

Anodizado electroquímico

El anodizado electroquímico es un método de modificación superficial de metales y aleaciones con el cual es posible obtener películas protectoras de mayor dureza, mayor resistencia al desgaste y mayor resistencia a la corrosión. En términos simples, este proceso consiste en sumergir un material metálico en una solución química compuesta generalmente por agua, por un componente de alta viscosidad como el glicerol o etilenglicol, y finalmente por alguno de los siguientes: ácido sulfúrico (H_2SO_4), sulfato de sodio (Na_2SO_4), ácido etanoico (CH_3COOH), ácido fosfórico (H_3PO_4), ácido fluorhídrico (HF), fluoruro de amonio (NH_4F), ácido clorhídrico (HCl), entre otros. Posteriormente, con ayuda de una fuente de alimentación, el metal es sometido a una diferencia de potencial (voltaje) durante cierto periodo de tiempo y a una temperatura controlada. El metal comienza a perder electrones debido al voltaje aplicado, por lo que adquiere una carga eléctrica positiva. Como resultado, los iones de oxígeno disueltos en la solución son atraídos hacia la superficie, formando lo que se conoce como capa o película protectora de óxido (Andoko *et al.*, 2024).

De acuerdo con varias recopilaciones, el anodizado electroquímico se ha empleado principalmente en aleaciones compuestas en su mayoría por aluminio y

titanio (Araujo *et al.*, 2024; Chikkamath *et al.*, 2026). El aluminio y el titanio ocupan el primer y noveno lugar, respectivamente, entre los elementos más abundantes de la corteza terrestre. Asimismo, la gran variedad de manuales de la American Society for Metals International (ASM International) destacan sus propiedades físicas, mecánicas y químicas, responsables de su uso en múltiples sectores. En muchas de las tecnologías actuales, se ha hecho uso de aleaciones compuestas por ambos elementos, ampliando indiscriminadamente el campo de sus aplicaciones. Sin embargo, aun con todas estas características, estos materiales continúan presentando dificultades en condiciones de trabajo mucho más agresivas (desbastado, erosión, altas concentraciones de iones corrosivos, entre otras). Por lo que se puede considerar al anodizado como una excelente opción si se desea mejorar las cualidades superficiales del metal base, tales como una mayor resistencia mecánica, baja abrasividad, resistencia a la corrosión e incluso el aumento de la biocompatibilidad. Si consideramos estas destrezas como punto de partida para la elección del metal base, el titanio se encuentra muy por encima del aluminio. Por lo que a partir de ahora nos enfocaremos más en los efectos que provoca el anodizado en la superficie de este material y en cómo es capaz de potenciar aún más sus propiedades.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de anodización proporciona una capa protectora de óxido; en el caso específico del titanio, una capa compuesta por dióxido de titanio (TiO_2). Sin embargo, bajo determinadas condiciones, la capa de óxido puede dejar de ser uniforme y desarrollar una estructura constituida por

nanotubos de TiO_2 . La formación de esta nanoestructura ocurre como consecuencia de la disolución de la capa, prácticamente al mismo tiempo que la oxidación. Cabe resaltar que este comportamiento se presenta exclusivamente por la presencia de flúor o cloro en la solución, ya que estos elementos "atrapan" con mayor facilidad al titanio. El hidrógeno presente reacciona con el oxígeno del TiO_2 , de tal manera que abandona por completo al titanio y forma moléculas de agua que se quedan en la solución. El titanio ahora sin oxígeno reacciona con los iones de flúor o de cloro y se desprende de la superficie, lo que provoca una especie de "perforación" y formación de poros. Este proceso se repite y ocurre de manera continua en diferentes zonas de la superficie, siempre y cuando el sistema se mantenga sometido a cierto voltaje. Interrumpido este parámetro, el anodizado finaliza y se obtiene como resultado la formación de nanotubos de TiO_2 (Hernández Montiel *et al.*, 2023). La Figura 2 muestra dos imágenes de nanotubos de TiO_2 obtenidos después del anodizado con ayuda de un Microscopio Electrónico de Barrido de Emisión de Campo. Más específicamente, la Figura 2a muestra los nanotubos vistos desde arriba y la Figura 2b la sección transversal de los mismos.

Las aplicaciones más comúnmente designadas para los nanotubos de TiO_2 son aquellas en las que se involucra el movimiento de electrones, es decir, donde se les suministra o recolecta una corriente eléctrica. Al ser un material semiconductor, el TiO_2 tiene la capacidad de controlar el movimiento de los electrones. Además, la presencia de los nanotubos facilita su transporte, mejorando la eficiencia del material. Sus destacadas habilidades les permiten ser objeto de

estudio en aplicaciones como fotocátalisis, producción de hidrógeno, detección de metales pesados y contaminantes orgánicos, celdas solares, biomedicina, detección de gases, lubricantes sólidos, recubrimientos duros, entre otros. Al igual que la mayoría de los nanomateriales, los nanotubos de TiO_2 presentan lo que se conoce como una alta área reactiva o de interacción (Zakir *et al.*, 2023). Si imaginamos que el nanotubo se corta a lo largo y se desdobra como si fuera papel, el área expuesta a las interacciones físicas, químicas o eléctricas es considerablemente grande a esa escala. Si tomamos en cuenta que en las películas de TiO_2 anodizadas hay miles de estas nanoestructuras, la respuesta en relación con el estímulo físico, químico o eléctrico se incrementará de manera súbita, dando como resultado propiedades mucho más aprovechables.

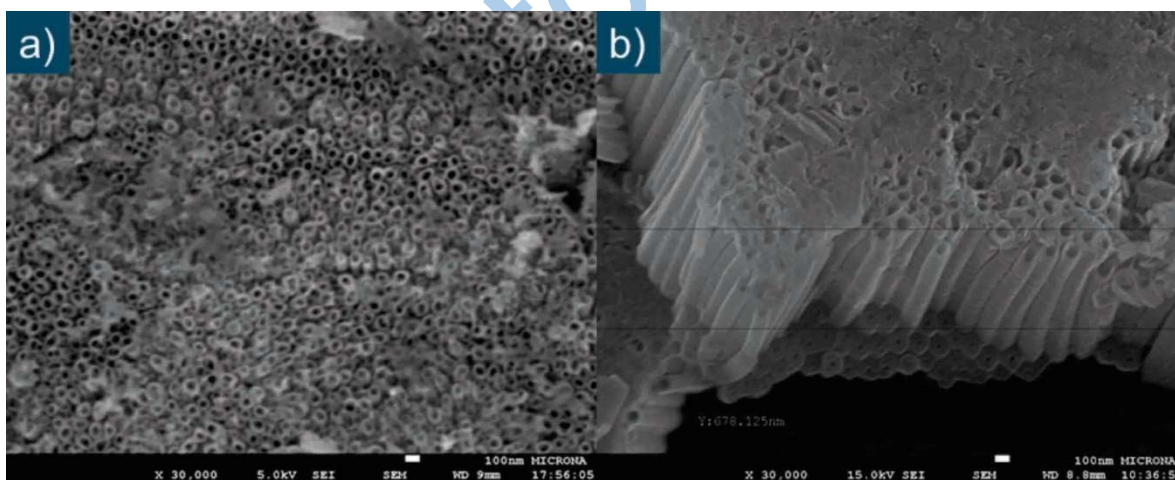


Figura 2. Nanotubos de TiO_2 obtenidos mediante la técnica de anodizado electroquímico: a) imagen de la superficie y b) vista transversal.

Es importante mencionar que no se requieren equipos o herramientas tan complejas para la aplicación de esta técnica. De manera general, solo es necesario

contar con una fuente de alimentación, reactivos químicos, el titanio, algo de cableado y algunos materiales más. Esto la convierte en una de las técnicas más accesibles, tanto por su practicidad como por su bajo costo. También es considerado un proceso de gran versatilidad, ya que modificar el voltaje, el tiempo, el tipo y cantidad de reactivos, entre otros parámetros, repercutirá en la forma, tamaño e incluso en los elementos químicos presentes en el nanomaterial. Esta situación causa un significativo efecto sobre las propiedades de los nanotubos, ampliando considerablemente su campo de estudio y sus aplicaciones. Un claro ejemplo es el uso de sustancias a base de cloro, donde los nanotubos obtenidos son menos ordenados que los producidos por sustancias con flúor. No obstante, existen reportes en la actualidad donde estos nanotubos son capaces de mejorar hasta en un 50 % la dureza, la abrasividad y la resistencia al desgaste del titanio (Hernández Montiel *et al.*, 2022). Por lo que, sumado a la capacidad anticorrosiva y biocompatible del TiO_2 , se abren posibilidades para el desarrollo de biomateriales como implantes y prótesis ortopédicas.

Erosión catódica o sputtering

La técnica de erosión catódica es actualmente una de las más utilizadas en las industrias de procesamiento de semiconductores, la fabricación de joyería y, al igual que el anodizado electroquímico, en el acabado y tratamiento de superficies. Esta última es la más destacada y, aún en estos tiempos, muy indagada por científicos e

investigadores. De manera general, consiste en el depósito de uno o más materiales metálicos, aislantes, semiconductores o cerámicos sobre la superficie de un sustrato seleccionado. El proceso se lleva a cabo dentro de una cámara completamente sellada para impedir la entrada de aire, humedad y otros elementos que podrían contaminar el recubrimiento durante su formación. Para evitar lo más posible la presencia de impurezas, se hace uso de bombas extremadamente potentes para extraer la mayor cantidad de aire y partículas pequeñas. Normalmente, las bombas utilizadas son la mecánica, que se encarga de extraer la mayor parte del aire y los gases atmosféricos de la cámara, y la turbomolecular, que se encarga de seguir succionando la materia restante con más potencia y velocidad. Cuando la cámara se queda con muy pocas moléculas de gas, la presión disminuye muy por debajo de la atmosférica. Este comportamiento lleva por nombre presión de vacío o simplemente vacío, que, dicho de otra manera, es un estado de baja presión generado por la elevada escasez de las moléculas del gas. Debido a limitaciones técnicas como la eficiencia de las bombas, fugas en la cámara del equipo, entre otras, no es posible obtener una presión de vacío absoluta. Es decir, nunca es posible extraer todas las moléculas de gas del interior de la cámara de sputtering.

Una vez alcanzado el suficiente vacío, se procede a suministrar cierta cantidad de gas inerte, es decir, un gas que no interactúa químicamente con los materiales y sustratos destinados a usarse en el proceso; en la mayoría de los casos, el gas empleado es el argón. No obstante, se suele incluir un gas reactivo como el nitrógeno o el oxígeno con la intención de formar metales nitrurados u oxidados, ya

que se les considera los de mayor estabilidad química y los de mejores propiedades en general. Dentro de la cámara ya se encuentran colocados los targets o blancos, que son básicamente los materiales que se van a depositar. Se caracterizan por estar mecánicamente compactados y pueden ser de: titanio, aluminio, níquel, hafnio, vanadio, entre otros.

El proceso comienza aplicando una diferencia de potencial a los blancos involucrados, que por lo regular va desde los vatios hasta los kilovatios. Los blancos se convierten en cátodos (presentan una carga eléctrica negativa), provocando que electrones libres del interior de la cámara sean acelerados. Estos electrones chocan con los átomos de argón, expulsando un nuevo electrón de su estructura, que posteriormente también será acelerado por los cátodos. El argón deja de ser un átomo neutro, cambia su carga eléctrica y se convierte en un ion positivo (Ar^+) por la pérdida del electrón. Este fenómeno ocurre repetidamente en el interior de la cámara, generando una enorme cantidad de iones positivos que luego son atraídos hacia los cátodos por la diferencia de cargas eléctricas. Esto ocasiona que de la superficie de los blancos se desprendan grandes cantidades de átomos metálicos, los cuales son dirigidos a la superficie del sustrato donde finalmente se condensan y forman una película o recubrimiento (Dennard *et al.*, 2018). Tomando en cuenta las condiciones de trabajo tan precisas, así como la cantidad de materiales que requiere utilizar, este proceso entra definitivamente en la categoría de los más sofisticados, por lo que su costo, en comparación con el anodizado electroquímico,

es cientos de veces más elevado. En la Figura 3 se muestra una representación general de este proceso.

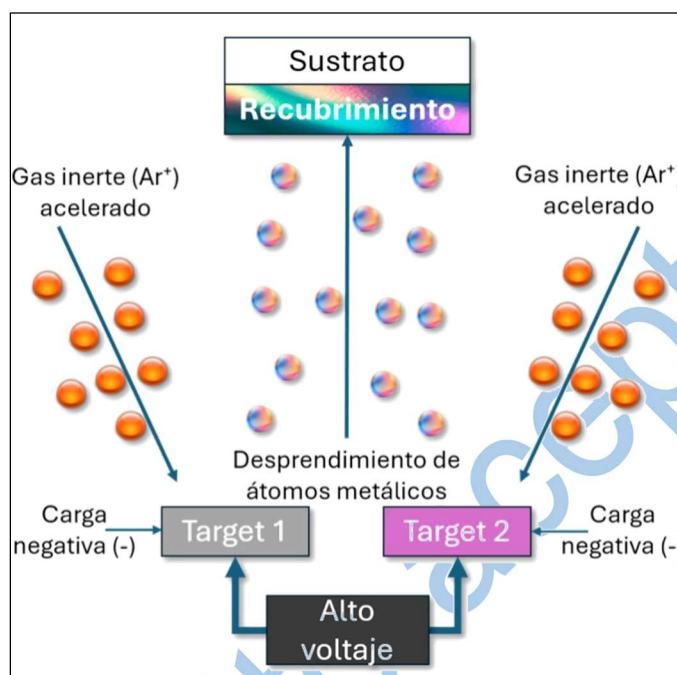


Figura 3. Representación general del proceso de depósito mediante la técnica de sputtering.

Las propiedades de este nuevo recubrimiento dependerán principalmente de la compatibilidad entre los metales fusionados, su acomodo atómico, la adherencia con el sustrato y el tamaño del espesor. Este último se considera uno de los factores primordiales cuando de recubrimientos se habla, puesto que su consistencia es la clave en la mejora de las propiedades y en las aplicaciones destinadas. En comparación con el anodizado electroquímico, los recubrimientos o películas obtenidas con la técnica de sputtering suelen ser altamente uniformes y de baja rugosidad, ya que no presentan estructuras huecas o porosas. El control y la optimización de este proceso permite que el recubrimiento se forme de manera muy

precisa, uniendo capas nanométricas de los átomos arrojados hasta alcanzar espesores que van desde 1 nanómetro hasta decenas de micras. En la Figura 4 se muestran cuatro imágenes de recubrimientos de nitruro de hafnio (HfN) obtenidos con la técnica de sputtering. Las condiciones de fabricación difieren ligeramente, con excepción del hafnio como blanco y el uso de nitrógeno como gas reactivo. De primera mano es posible notar cómo sobre la superficie se obtienen una especie de aglomerados, mejor conocidos como granos (Figuras 4a y 4b). Su crecimiento mediante capas nanométricas superpuestas, además del acomodo de su estructura interna en forma de cristales, le otorgan la característica de material nanoestructurado, una de las clasificaciones de los tipos de nanomateriales mencionados anteriormente. La vista transversal de estos elementos permite evaluar el tamaño de su espesor (Figuras 4c y 4d), reafirmando su alta uniformidad superficial a pesar de presentar un tamaño extremadamente delgado de entre 1 y 2 micras (1000 o 2000 veces más grande que un material nanométrico, respectivamente). Las aplicaciones destinadas para este tipo de recubrimientos se amplían considerablemente, entre las cuales sobresalen: celdas solares, electrónica, catálisis de agua, producción de hidrógeno, aplicaciones biomédicas, lubricantes sólidos y mejora de las propiedades mecánicas. En estudios recientes, se ha observado que estos recubrimientos son capaces de disminuir la abrasividad hasta un 75 %, alargando considerablemente la vida útil del sustrato (Hernández Campos *et al.*, 2025). Son propiedades muy similares a las del TiO_2 anodizado, pero que en este caso dependen más de los elementos combinados en el recubrimiento

que del sustrato utilizado, por lo que la clave para su elección está específicamente en su destino y en lo que pueda brindar mayores ventajas al usuario o usuarios.

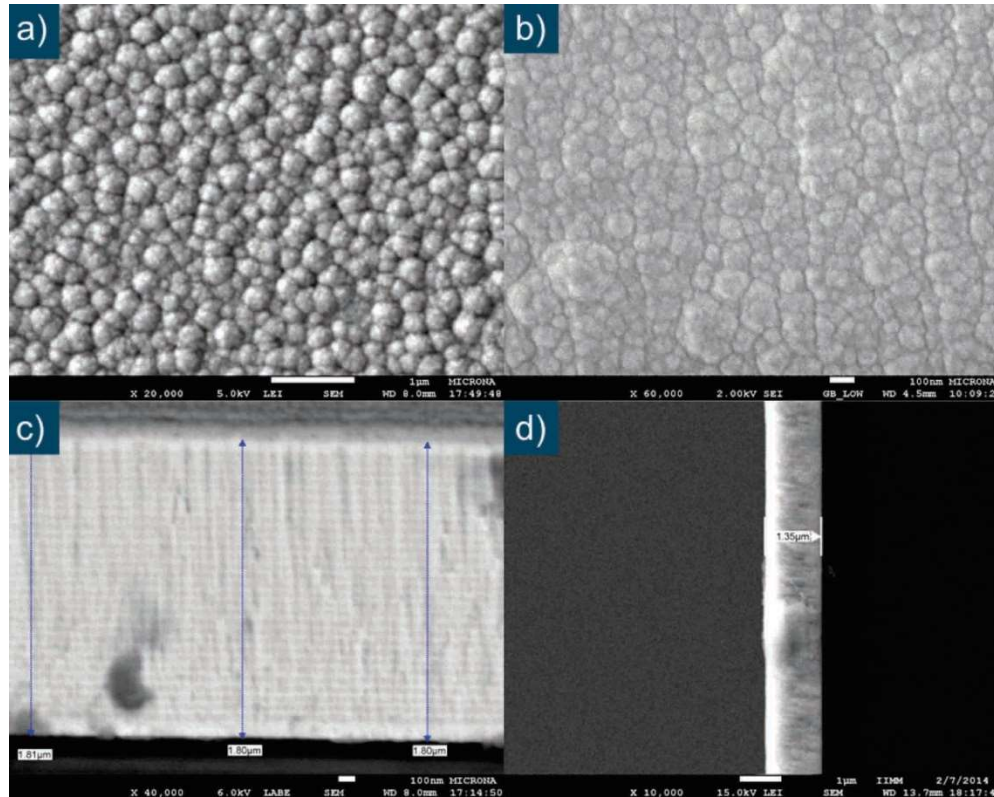


Figura 4. Recubrimientos de HfN obtenidos mediante la técnica de sputtering: a) y b) imágenes de la superficie, y c) y d) vista transversal.

Conclusiones

Se hizo mención de dos técnicas de fabricación de materiales diferentes y muy importantes, que en la actualidad son altamente empleadas para la mejora superficial. Su mayor diferencia y, al mismo tiempo, característica distintiva es la formación de nanomateriales con diferentes formas y dimensiones. El uso de cada

una de ellas dependerá principalmente de las aplicaciones destinadas, así como de los recursos económicos disponibles. No obstante, las investigaciones tanto del anodizado electroquímico como de sputtering continúan avanzando a pasos agigantados, con la única finalidad de otorgar a las tecnologías actuales materiales sobresalientes que puedan mejorar la calidad de vida no solo de los seres humanos, sino de la vida en general.

Referencias

Andoko A, Khoyroh SB, Aminnudin A and Prasetya R (2024). Overview of anodization and silver coating for titanium alloys: Process parameters and biomedical insights. *Mechanical Engineering for Society and Industry* 4(3):318-336. DOI: <https://doi.org/10.31603/mesi.11986>.

Araujo JV de S, Milagre M and Costa I (2024). A historical, statistical and electrochemical approach on the effect of microstructure in the anodizing of Al alloys: a review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences* 49(4):521–581. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408436.2023.2230250>.

Chikkamath AS, Meti VKV, Siddhalingeshwar IG *et al.* (2026). Enhanced Corrosion Resistance and Aesthetic Properties of Titanium Alloys through Stabilized Anodizing Processes: A Review. *IEEE Access* 14. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3679601>.

Corpus Mendoza CI, Rodríguez Contreras GR y Navarro Tovar G (2023). Nanomateriales: un rompecabezas científico. *Elementos* 129:41–46. Disponible en: <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads//00000008143.pdf>.

Dennard RH, Cai J and Kumar A (2018). Handbook of Thin Film Deposition. In *Handbook of Thin Film Deposition*. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03243-6>.

Hernández Campos MA, Santaella González JB, Hernández Torres J *et al.* (2025). Structure, mechanical properties and tribological behavior of Hf/HfN multilayer coatings deposited by magnetron

sputtering. *Surface and Coatings Technology* 496:131647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131647>.

Hernández Montiel S, Rodríguez Jiménez R y García González L (2023). Modificando la superficie del titanio para reducir su desgaste. *Elementos* 130:70–74. Disponible en: <https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads//00000008410.pdf>.

Hernández Montiel S, Hernández Torres J, Zamora Peredo L *et al.* (2022). Effect of hardness and abrasive properties of TiO₂ anodized with HCl and heat treated. *Materials Letters* 320:132329. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132329>.

Sánchez Flores FA (2025). Los logros científicos y tecnológicos más importantes del 2025. Academia de Ciencias de Morelos, A.C., 2.

Zakir O, Ait-Karra A, Idouhli R *et al.* (2023). Effect of anodization time on the morphological, structural, electrochemical, and photocatalytic properties of anodic TiO₂ NTs. *Journal of Solid State Chemistry* 322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2023.123939>.