

El uso de la anodización en materiales

Juan Luis Paredes

INTRODUCCIÓN

Anodización o **anodizado** es una técnica utilizada para modificar la superficie de un material. Se conoce como anodizado a la capa de protección artificial que se genera sobre el metal mediante el óxido protector del metal. Esta capa se consigue por medio de procedimientos electroquímicos, de manera que se obtiene una mayor resistencia y durabilidad del material seleccionado. Para este trabajo el material seleccionado ha sido el Titanio.

Con este tratamiento se consigue la oxidación de la superficie del titanio, creando una capa protectora en toda la pieza. La protección del titanio dependerá en gran medida del espesor de esta capa (en micras) de óxido formado.

El nombre del proceso deriva del hecho de que la parte a tratar del material se conecta como ánodo en el circuito eléctrico del proceso electrolítico.

La anodización es usada frecuentemente para proteger al aluminio y al titanio de la abrasión, la corrosión, y para poder ser tintado en una amplia variedad de colores.

GENERALIDADES

Titanio

Es un elemento metálico que presenta una estructura hexagonal compacta, es duro, refractario y buen conductor de la electricidad y el calor. Presenta una alta resistencia a la corrosión (casi tan resistente como el acero inoxidable) y cuando está puro, se tiene un metal ligero, fuerte, brillante y de una densidad relativa baja.

Es un elemento metálico blanco plateado que se usa principalmente para preparar aleaciones ligeras y fuertes. Su número atómico es 22 y es uno de los elementos de transición del sistema periódico.

El titanio es un metal abundante en la Tierra que presenta buenas propiedades mecánicas, resistente a la corrosión, alta dureza, ligero, y además, es biocompatible. Estas características hacen que el titanio y sus aleaciones sean muy utilizados en una gran variedad de aplicaciones tecnológicas, sobre todo en la industria médica, química, naval y aeroespacial.

Para mejorar las propiedades superficiales del titanio manteniendo sus buenas propiedades macroscópicas, se le puede someter a diversos tratamientos superficiales, entre ellos el de oxidación.

Existen distintas técnicas para llevar a cabo la oxidación superficial del titanio permitiendo su coloración, como son el tratamiento térmico, el procesado con plasma o la oxidación electrolítica, también denominada anodización, siendo esta última la más utilizada en la industria.

Sus propiedades y estado natural

El titanio sólo es soluble en ácido fluorhídrico y en ácidos en caliente como el sulfúrico; en ácido nítrico no es soluble ni en caliente. El metal es extremadamente frágil en frío, pero es muy maleable y dúctil al rojo vivo moderado. Tiene un punto de fusión de 1660° C, un punto de ebullición de 3287° C y una densidad relativa de 4.5. Su masa atómica es 47.9.

El titanio arde con oxígeno a 610° C formando dióxido de titanio, y con nitrógeno a 800° C formando nitruro de titanio (TiN). Las valencias del titanio son 4, 3 y 2, y forma las sales siguientes: tetracloruro de titanio (TiCl₄), tricloruro de titanio (TiCl₃) y dicloruro de titanio (TiCl₂).

Ocupa el lugar 9 en abundancia entre los elementos de la corteza terrestre, pero nunca se encuentra en estado puro. Existe como óxido en los minerales ilmenita (FeTiO₃), rutilo (TiO₂) y esfena (CaO · TiO₂ · SiO₂).

Para obtener el óxido de titanio se tritura el mineral y se mezcla con carbonato de potasio y ácido fluorhídrico produciendo fluorotitanato de potasio (K_2TiF_6). Éste se destila con agua caliente y se descompone con amoníaco. Así se obtiene el óxido hidratado amoniacal, que se inflama a 700-800° C en un recipiente de platino produciendo dióxido de titanio (TiO_2). Para obtener el titanio en forma pura, se trata el óxido con cloro, con lo que se obtiene tetracloruro de titanio, un líquido volátil; después se reduce ese líquido con magnesio en una cámara de hierro cerrada para producir titanio metálico. Por último se funde el metal y se moldea en lingotes.

Aplicaciones

Debido a su resistencia a la corrosión y su peso ligero, el titanio se usa en aleaciones metálicas y como sustituto del aluminio. Aleado con aluminio y vanadio, se utiliza en los aviones para fabricar las puertas contra incendios, la capa exterior, los componentes del tren de aterrizaje, el entubado hidráulico y las protecciones del motor. Los álabes del compresor, los discos y los revestimientos de los motores a reacción también están hechos de titanio. Un avión a reacción de transporte utiliza entre 318 y 1134 kg del metal, y un avión supersónico, que vuela a velocidades entre los 2410 y los 3220 Km/h, utiliza entre 14 y 45 toneladas. El titanio se usa ampliamente en misiles y cápsulas espaciales; las cápsulas *Mercurio*, *Gemini* y *Apolo* fueron construidas casi totalmente con titanio. Otras aleaciones comunes de titanio son: el ferrocarril de titanio, que se obtiene reduciendo la ilmenita con coque en un horno eléctrico; el cuprotitanio, que se produce por la reducción de rutilo al que se ha añadido cobre, y el manganotitanio, que se obtiene reduciendo el rutilo al que se ha añadido manganeso u óxidos de manganeso.

La relativa inercia del titanio le hace eficaz como sustituto de los huesos y cartílagos en cirugía, así como para las tuberías y tanques que se utilizan en la elaboración de los alimentos. Se usa en los intercambiadores de calor de las plantas de desalinización debido a su capacidad para soportar la corrosión del agua salada. En metalurgia, las aleaciones de titanio se usan como desoxidantes y desnitrogenantes para eliminar el oxígeno y el nitrógeno de los metales fundidos. El dióxido de titanio (conocido como titanio blanco), es un pigmento blanco y brillante que se utiliza en pinturas, lacas, plásticos, papel, tejidos y caucho.

COMPUESTOS DEL TITANIO

Haluros de titanio

Dicloruro de titanio: $TiCl_2$ masa molar 118.82. Forma cristales negros, hexagonales. No se sublima por calen-

tamiento en el vacío hasta 600° C., pero pasada esta temperatura se descompone gradualmente en titanio metálico y tetracloruro de titanio. Se oxida rápidamente en el aire húmedo con formación de dióxido de titanio y ácido clorhídrico. Reaccionando con el agua, deja hidrógeno en libertad y forma una solución de tricloruro de titanio. El dicloruro de titanio se prepara por dismutación del tricloruro a unos 475° C en el vacío. Si se dispone de titanio metálico, se prepara fácilmente tratando el metal con tetracloruro de titanio a unos 900° C.

Tricloruro de titanio (cloruro titanoso): $TiCl_3$ masa molar 154.28. Forma cristales hexagonales de color púrpura oscuro. Se sublima a unos 425° C. en el vacío, pero a temperaturas más altas se descompone en tetracloruro de titanio y dicloruro de titanio, que queda como residuo. En el aire húmedo se oxida rápidamente a dióxido de titanio y cloruro de hidrógeno, pero en el agua se forman soluciones de color púrpura que son estables en atmósfera sin oxígeno. El tricloruro de titanio se prepara por reducción del tetracloruro con hidrógeno a elevadas temperaturas; el tricloruro se forma sobre un tubo enfriado que se introduce en la mezcla de reacción. Como agentes reductores pueden también usarse el titanio o los metales alcalinos o alcalinotérreos.

Tricloruro de titanio hexahidratado: $TiCl_3 \cdot 6H_2O$. Cristaliza de la solución acuosa de tricloruro de titanio y tiene interés industrial como reductor. En cambio, no tiene ningún interés el producto anhidro. La ventaja del tricloruro de titanio hexahidrato sobre la sal anhidra es que se prepara más fácilmente a gran escala. Así, las soluciones acuosas de tetracloruro de titanio se reducen por electrólisis hasta que prácticamente todo el titanio está en estado trivalente; se concentra la solución por evaporación y se separan los cristales hexahidratados de las aguas madres por filtración o centrifugación.

Tetracloruro de titanio: $TiCl_4$ masa molar 189.73. Es un líquido transparente, incoloro; p.f., -24.8° C.; p.eb., 135.8° C, 1.719. Da soluciones acuosas transparentes que se hidrolizan rápidamente y forman una serie de cloruros básicos, $Ti(OH)Cl_3$, $Ti(OH)_2Cl_2$, $Ti(OH)_3Cl$, y finalmente óxido de titanio hidratado, $TiO_2 \cdot xH_2O$. Se reduce con facilidad por el hidrógeno, metales alcalinos y metales alcalinotérreos a cloruros inferiores y en algunos casos al metal libre. Forma compuestos de adición con amoníaco, sulfuro de hidrógeno, tricloruro de fósforo, cianuro de hidrógeno y varios compuestos orgánicos. También reacciona con otros compuestos orgánicos, como los alcoholes, con formación de ésteres de titanio.

El tetracloruro de titanio se prepara industrialmente por cloración de mezclas de carbono y dióxido de titanio

o por cloración de carbonitruros de titanio. La materia prima en el primer método es un mineral rutilo de alto contenido de titanio, mientras que el carbonitruro procede de un dióxido de titanio de grado técnico que se obtiene del mineral ilmenita. El tetracloruro de titanio crudo, producto de la cloración, ha de purificarse por tratamiento y destilación, en particular para eliminar del producto pequeñas cantidades de tetracloruro de vanadio y cloruro férrico.

El tetracloruro de titanio es el haluro de titanio más importante. Su principal uso es como materia prima para la producción industrial de titanio metálico, pero también se usa en menor cantidad para producir cortinas de humo y para escribir en el cielo. Se usa como materia prima de los pigmentos de dióxido de titanio, preparados por hidrólisis de la solución acuosa y por oxidación en fase vapor, pero estos métodos tienen poca importancia comparados con el método industrial de producción a partir de solución de sulfato de titanio. Se usan también pequeñas cantidades de tetracloruro de titanio para fabricar gemas de rutilo y compuestos orgánicos de titanio.

Se conocen *clorotitanatos* (hexaclorotitanatos[IV], M_2TiCl_6 de cesio y de rubidio).

Dibromuro de titanio: $TiBr_2$, masa molar 207.74. Es un polvo de color negro intenso. No se sublima a $400^\circ C$, pero empieza a descomponerse en titanio metálico y tetrabromuro de titanio a unos $500^\circ C$. En el aire se oxida rápidamente y en el agua desprende hidrógeno. Se prepara por adición cuidadosa de bromo a metal titanio o por dismutación del tribromuro de titanio a $400^\circ C$.

Tribromuro de titanio: $TiBr_3$ masa molar 287.66. Es un polvo cristalino negro azulado que se presenta en dos formas cristalinas: hexagonal y otra forma que puede ser hexagonal, tetragonal u ortorrómbica. A temperaturas por debajo de $400^\circ C$, el tribromuro de titanio se sublima, pero por encima de esta temperatura se descompone en tetrabromuro y dibromuro de titanio. Se oxida rápidamente en el aire a dióxido de titanio, pero forma soluciones acuosas estables de color violeta oscuro.

Análogamente al tricloruro, el tribromuro de titanio se prepara reduciendo con hidrógeno el tetrabromuro, usando un tubo frío sobre el que se solidifica el producto. Otros reductores son el titanio metálico y los metales alcalinos o alcalinotérreos.

El tribromuro de titanio hexahidratado: $TiBr_3 \cdot 6H_2O$, se obtiene en cristales de color violeta rojizo de la solución acuosa de tribromuro de titanio por evaporación y enfriamiento. Se prepara mejor por reducción electrolítica de soluciones de tetrabromuro hasta que todo el titanio esté en estado trivalente y procediendo entonces como antes.

Tetrabromuro de titanio: $TiBr_4$ masa molar 367.56. Es un polvo cristalino delicuescente,¹ de color amarillo limón. Pertenecce al sistema cúbico; p.f., $38.2^\circ C$; p.eb., $230^\circ C$. Reacciona con agua fría formando soluciones que contienen oxibromuro de titanio y ácido bromhídrico, pero rápidamente se hidroliza en soluciones calientes con formación de óxido de titanio hidratado. Se ha publicado la existencia de sales básicas correspondientes a las fórmulas $Ti(OH)_2Br_2$ y $Ti(OH)_3Br$. Al igual que el tetracloruro de titanio, se puede reducir a haluros inferiores por el hidrógeno o por metales de los grupos alcalino y alcalinotérreo. También forma compuestos de adición con amoníaco, sulfuro de hidrógeno, tricloruro de fósforo, cianuro de hidrógeno y algunos compuestos orgánicos.

Se prepara el tetrabromuro de titanio por bromación del carbonitruro de titanio o de mezclas de dióxido de titanio-carbono. También se obtiene por tratamiento del tetracloruro de titanio con bromuro de hidrógeno, aumentando gradualmente la temperatura hasta que destile todo el tetrabromuro de titanio. Esta sal se ha usado como materia prima para obtener titanio metálico, pero actualmente parece tener poca importancia industrial.

Diyoduro de titanio: TiI_2 , masa molar 301.72. Cristaliza en plaquitas brillantes negras. Parece ser dimorfo, pero sólo se ha determinado la estructura cristalina de la modificación hexagonal. Su densidad es $4.3g mL^{-1}$. No se sublima en el vacío hasta $450^\circ C$, pero a temperaturas más altas se sublima y descompone en titanio metálico y tetrayoduro de titanio; En el aire es muy higroscópico y se oxida con rapidez. Reacciona enérgicamente con el agua, con desprendimiento de hidrógeno.

El diyoduro de titanio se prepara por reacción del titanio metálico con yodo, calentando la mezcla a $440^\circ C$ para eliminar el tetrayoduro. También se obtiene por reducción del tetrayoduro de titanio con plata o mercurio. Salvo su formación como intermediario en la preparación de titanio metálico muy puro, el diyoduro carece de importancia industrial.

Triyoduro de titanio: TiI_3 masa molar 428.63. Forma cristales de color negro violáceo, con lustre metálico. No se sublima por calentamiento en el vacío a $300^\circ C$, pero a unos $350^\circ C$ empieza a descomponerse en diyoduro y tetrayoduro de titanio. Se disuelve en agua y forma soluciones estables. El triyoduro de titanio se prepara por reacción directa de los elementos en condiciones cuidadosamente reguladas. Se prepara en forma de hexahidrato por reducción electrolítica de una solución acuosa de tetrayoduro de titanio, evaporando, enfriando y separando los cristales resultantes. Se oxida rápidamente en el aire.

Tetrayoduro de titanio: TiI_4 masa molar 555.54. Forma cristales pardos rojizos octaédricos del sistema cúbico; p.f., $150^\circ C.$; p.eb., $377^\circ C.$ Es fumante al aire y se convierte con rapidez en dióxido de titanio. Se disuelve en agua; las soluciones se hidrolizan rápidamente en sales básicas y por último en óxido de titanio hidratado y ácido yodhídrico. Forma compuestos de adición con unos pocos compuestos orgánicos.

Se prepara por tratamiento del titanio metálico con yodo en condiciones cuidadosamente reguladas. También se obtiene tratando tetracloruro de titanio líquido con yoduro de hidrógeno, aumentando gradualmente la temperatura de la mezcla hasta que destile todo el tetrayoduro de titanio. No tiene importancia industrial como producto, pero es un intermediario importante en la fabricación del titanio metálico muy puro con el metal bruto.

Difluoruro de titanio, TiF_2 masa molar 85.90. Cristales prismáticos de color púrpura oscuro; se dice que se ha preparado calentando fluorotitanato potásico en hidrógeno. No se ha demostrado su existencia.

Trifluoruro de titanio: TiF_3 , masa molar 104.90. Forma cristales de color púrpura intenso, solubles en agua. Se prepara por reducción del tetrafluoruro con metales alcalinos o alcalinotérreos.

Tetrafluoruro de titanio: TiF_4 masa molar 123.90. Es un polvo blanco higroscópico. Se sublima cuando se calienta. Su punto de ebullición se ha calculado en $284^\circ C.$ Es soluble en agua, de la que por evaporación se obtiene un dihidrato. El mejor método de obtención del producto anhidro es tratar tetracloruro de titanio líquido con fluoruro de hidrógeno líquido anhidro. Se desprende cloruro de hidrógeno y al destilar la mezcla se obtiene tetrafluoruro de titanio como fracción de alto punto de ebullición.

Fluorotitanato potásico (hexafluotitanato [IV] de potasio): K_2TiF_6 , masa molar 240.10. Forma cristales romboédricos pequeños y de gran poder de reflexión; p.f., $780^\circ C.$ Si se calienta en el aire por encima de $500^\circ C.$, se oxida gradualmente a dióxido de titanio y fluoruro potásico. Es moderadamente soluble en agua caliente y por enfriamiento se separan cristales del monohidrato, $K_2TiF_6 \cdot H_2O$.

El fluorotitanato potásico se obtiene por disolución de dióxido de titanio en ácido fluorhídrico, adición de fluoruro potásico, enfriamiento, cristalización y filtración para obtener el monohidrato. Éste se deshidrata calentando por encima de $100^\circ C.$ El fluorotitanato potásico se usa como agente de refinado del grano del aluminio, como gelificante del caucho y se ha indicado como materia prima para preparar titanio metálico por electrólisis de la sal fundida.

Hidruros de titanio

El hidruro de titanio es un polvo de aspecto metálico de composición química variable. Muestra dos fases de solución sólida de hidrógeno en titanio, una fase α pobre en hidrógeno y una fase β rica en hidrógeno. En general, la fase α es estable a temperaturas altas en un amplio intervalo de presión, mientras que la fase β es estable a temperaturas bajas y presiones altas. Ambas fases coexisten en un intervalo limitado de presión-temperatura (1, 2, 3). Estudios de difracción de rayos X en preparados de hidruro de titanio muestran que la fase α es hexagonal y la fase β es cúbica de caras centradas. Hay testimonios de la existencia de compuestos bien definidos, como TiH_2 y TiH_4 particularmente del primero, pero no están bien fundamentados (4, 5).

Pequeñas cantidades de hidrógeno disuelto en el metal titanio no cambian su densidad de modo apreciable. Sin embargo, una composición correspondiente a $TiH_{1.62}$ tiene de densidad 3.91, que es considerablemente más baja que la del titanio metálico puro. La absorción de hidrógeno en el metal titanio es un fenómeno reversible; temperaturas bajas y presiones altas favorecen la absorción de grandes cantidades de hidrógeno. Casi todo el hidrógeno puede ser eliminado del hidruro de titanio calentándolo en vacío a $600^\circ C.$ (6). En el aire, el hidruro de titanio no es higroscópico y es estable, pero si se calienta a $800^\circ C.$ arde con gran desprendimiento de calor.

El hidruro de titanio se obtiene calentando titanio metálico en polvo con hidrógeno. La composición del producto depende de la presión y de la temperatura. También se prepara tratando dióxido de titanio con hidruro cálcico o tetracloruro de titanio con hidruro sódico. En la industria de soldadura tiene alguna aplicación como fundente para la preparación de cierres de cerámica y metal o de vidrio y metal, y para introducir metal titanio en aleaciones que requieren una atmósfera protectora. Se ha propuesto su uso para titanizar planchas de cobre, níquel y hierro con el fin de darles un recubrimiento duro de una aleación titanio-cobre. El hierro y el níquel han de cobrizarse antes de la titanización.

Nitrato de titanio

El nitrato de titanio se forma probablemente al disolver óxido de titanio hidratado o titanatos en ácido nítrico. Por evaporación se forma una sal básica, $5TiO_2 \cdot N_2O_5 \cdot 6H_2O$, en placas.

Nitruros de titanio

Mononitruro de titanio: TiN , masa molar 61.91. Es un sólido de color amarillo bronce. Su estructura cristalina es

cúbica centrada en las caras, del tipo NaCl. La constante de red es 4.235 Å, correspondiente a una densidad teórica de 5.43 g/cm³. Se funde a 2950° C. y tiene una resistividad eléctrica de 21.7 microhm-cm a temperatura ambiente. Se ha publicado una dureza Knoop de 1770 Kg/mm² (100 g de carga). Su entropía molar a 298.16° K. es 7.20 u.e./mol. El producto no es fácilmente atacado por los ácidos clorhídrico, nítrico o sulfúrico, pero se disuelve en agua regia. El monóxido de titanio se obtiene por tostación de metal titanio con nitrógeno puro. En el momento actual no tiene usos importantes.

Se han publicado otros nitruros de titanio, correspondientes a las fórmulas Ti₃N₄, Ti₃N₆ y Ti₅N₆.

Óxidos de titanio

Monóxido de titanio, TiO, masa molar 63.90. Es un sólido de color bronce claro. Tiene estructura cúbica centrada en las caras, tipo NaCl, y una constante de red de 4.176 Å, que corresponde a una densidad teórica de 5.8 g/cm³. Se funde a 1760° C. y tiene una dureza Vickers (carga 5 Kg) aproximadamente de 1300 Kg/mm². La resistividad eléctrica es de 300 microhm-cm a 20° C. El monóxido de titanio se ataca lentamente por los ácidos clorhídrico, sulfúrico y nítrico concentrados y calientes; se disuelve en ácido fluorhídrico concentrado caliente. Se prepara por tostación del titanio metálico con dióxido de titanio (7, 8).

Trióxido de titanio: Ti₂O₃, masa molar 143.80. Es un sólido violeta oscuro. El compuesto es hexagonal, tipo corindón, con constantes de red $a_o = 5.14$ y $c_o = 13.61$ Å. Se han publicado su densidad por el método del picnómetro, igual a 4.48 g/cm³ y su punto de fusión de 1900° C. El sesquióxido de titanio se ataca sólo ligeramente por ácido sulfúrico concentrado caliente. Se prepara por tostación de titanio metálico con dióxido de titanio. No tiene por el momento usos de importancia.

Pentóxido trititanico (tritapentóxido de titanio, anovita): Ti₃O₅, masa molar 223.70. Es un sólido negro azulado con lustre metálico, cristalizado en el sistema ortorrómbico con las constantes de celda elemental $a_o = 3.747$, $b_o = 9.465$ y $c_o = 9.715$ Å, que dan una densidad calculada de 4.29 g/cm³. El punto de fusión de una composición próxima a la fórmula Ti₃O₅ se ha publicado como 1857° C.; se prepara por tostación del metal titanio con dióxido de titanio o por reducción de este último con hidrógeno o con monóxido de carbono a 700-1100° C. No tiene usos importantes por ahora.

Se han medido los calores específicos de TiO, Ti₂O₃, y Ti₃O₅ entre 52 y 298° K., y las entropías molares calculadas son de 8.31, 18.83 y 30.92 u.e./mol, respectivamente. Se han medido los contenidos de calor por encima de 298.16° K.

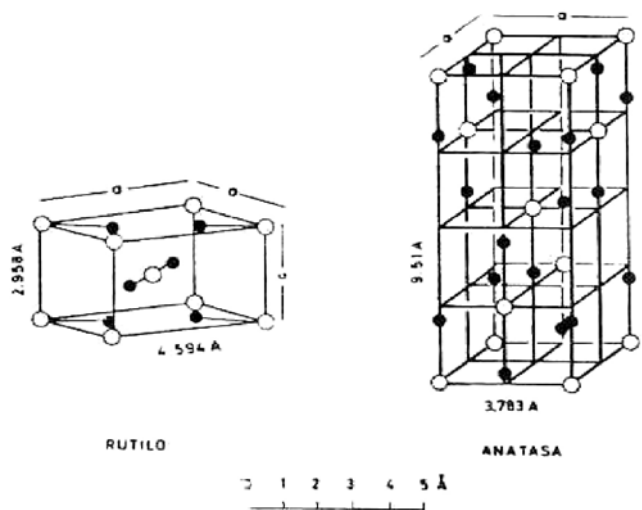


FIGURA I
Celdas elementales cristalinicas de la anatasa y el rutilo

y se han dado las ecuaciones del calor específico. Estos tres óxidos muestran puntos de transición a $1224 \pm 10^\circ$, $473 \pm 20^\circ$ y alrededor de 450° K., respectivamente.

Dióxidos de titanio, óxidos de titanio hidratados y titanatos. El dióxido de titanio (titania), TiO₂, masa molar 79.90, existe en tres formas: anatasa (octahedrita), brookita y rutilo. La anatasa es tetragonal, negativa uniaxial, $\epsilon = 2.493$, $\omega = 2.554$; la celda elemental contiene cuatro moléculas TiO₂ y un volumen de 136.1 Å³. El rutilo, tetragonal, es isómero, pero no isomorfo de la anatasa; positivo monoaxial, $\epsilon = 2.903$, $\omega = 2.616$; la celda elemental contiene dos unidades TiO₂ y un volumen de 62.4 Å³. La brookita es ortorrómbica, positiva biaxial, $2V = 30^\circ$ para luz de sodio, 0° para verde amarillento, dispersión muy fuerte, $n_\alpha = 2.583$, $n_\beta = 2.586$, $n_\gamma = 2.741$. La Figura 1 muestra las celdas elementales cristalinicas de la anatasa y el rutilo. Se distinguen mejor por métodos de difracción de rayos X.

La anatasa y la brookita son formas monotrópicas y se transforman en el rutilo estable a una velocidad que aumenta con la temperatura. Para los minerales naturales en ausencia de mineralizadores, Schroeder (9) halló que la brookita se transformaba en rutilo por encima de 650° C. mientras la conversión de la anatasa a rutilo se producía a $915 \pm 15^\circ$ C. Sin embargo, en presencia de fundentes adecuados, Bunting (10) halló que la anatasa y la brookita se convertían en rutilo a temperaturas mucho más bajas (400-500° C.) que las publicadas por Schroeder. Es sabido que anatasas artificiales se convierten en rutilo entre 100 y 300° C. (11).

Las tres formas cristalinicas del dióxido de titanio se encuentran en la Naturaleza, pero sólo la anatasa y el rutilo se producen industrialmente. En el proceso de fabricación se controla la formación de las especies cristalinicas.

La anatasa y el rutilo se caracterizan por sus altos índices de refracción, que son la causa de su gran opacidad y su alto poder de cubrimiento en relación con otros pigmentos blancos. Además, el dióxido de titanio es extraordinariamente estable a temperaturas ordinarias. Es relativamente insoluble en agua, ácidos orgánicos, álcalis diluidos y en la mayoría de los ácidos inorgánicos. Sólo los ácidos sulfúrico y fluorhídrico, concentrados y calientes, disuelven el dióxido de titanio. No se afecta por los gases, particularmente los que se encuentran en la atmósfera, pero en ciertas condiciones y en presencia de materia orgánica se convierte en los óxidos inferiores. Se forman también los óxidos reducidos al tratar el dióxido de titanio con gases reductores (hidrógeno, monóxido de carbono, etc.) a temperaturas moderadamente altas (600-900° C.). El dióxido de titanio reacciona con carbono y nitrógeno a elevadas temperaturas y forma carburos, nitruros y carbonitruros. También reacciona con otros óxidos metálicos, con formación de los llamados titanatos.

Tabla I
Propiedades físicas del dióxido de titanio.

PROPIEDAD	ANASTASA	RUTILO	BROOKITA
Sistema cristalino	Tetragonal	Tetragonal	Ortorrómico
Pf., °C	—	1825	—
d.	3.90	4.27	4.13
n _D	2.52	2.72	2.63
Dureza Mohs	5.5 - 6.0	7.0 - 7.5	5.5 - 6.0
Calor específico, cal/ (°C)(g) a 298 °K	0.169	0.169	—
Constante dieléctrica media	48	114	78
Conductividad eléctrica en el aire, mho/cm			
A temperatura ambiente	—	10 ⁻¹³ - 10 ⁻¹⁴	—
A 500 °C	5.5 x 10 ⁻⁸	—	—
A 1200 °C	—	0.12	—

Los óxidos de titanio hidratados son masas amorfas, como se puede ver por análisis de rayos X, con la fórmula empírica TiO₂·xH₂O, en que x, el número de moléculas de agua enlazadas, varía entre amplios límites, según el método de preparación. Aunque esta fórmula representa el óxido de titanio hidratado como hidrato de óxido, se usa mucho otro sistema de nomenclatura que clasifica los óxidos hidratados como ácidos orto y metatitánicos. La expresión ácido ortotitánico se usa para designar los óxidos de titanio muy hidratados y ricos en energía, que

contienen dos o más moles de agua por mol de dióxido de titanio. El nombre ácido metatitánico se reserva para los hidratos de óxido menos ricos en energía, que contienen aproximadamente un mol de agua por mol de dióxido de titanio (12, 1).

El ácido ortotitánico se obtiene por adición directa de álcalis a solución de sulfato de titanilo. El precipitado que resulta se separa por filtración, se lava y seca. Se usan también otras soluciones de sales de titanio como materia prima, pero se dispone más fácilmente del cloruro y del sulfato.

El ácido metatitánico se prepara fácilmente calentando soluciones acuosas diluidas de tetracloruro de titanio o de sulfato de titanilo. El ácido metatitánico precipita como un producto gelatinoso que se separa del líquido de hidrólisis por filtración, se lava y se seca.

El óxido de titanio hidratado es soluble en los ácidos sulfúrico y fluorhídrico concentrados, pero no se disuelve de modo apreciable en otros ácidos inorgánicos. Sin embargo, se peptiza bien por ácidos monobásicos siempre que esté suficientemente exento de sales o iones polivalentes (sulfatos) atrapados del líquido de hidrólisis. Tratado con álcalis, no se disuelve, pero cuando se trata con ellos experimenta cambios en el grado de hidratación y en otras propiedades físicas.

Anodizado

Cuando escuchamos este término, lo primero que se nos cruza por la mente es el coloreado del material, pues algo de eso tiene, pero en sí el proceso de anodizado es una forma de proteger el material en contra de los agentes atmosféricos o su entorno en general.

Luego del extruido o decapado (tratamientos de limpieza), este material entra en contacto con el aire y forma por sí solo una delgada película de óxido con un espesor más o menos regular de 0.01 μm denominada óxido, esta tiene algunas mínimas propiedades protectoras.

El anodizado y sus beneficios

Cuando quedan expuestos al medio ambiente, la mayoría de los metales sufre el proceso denominado "corrosión". Éste puede tener distintos grados de severidad, pero independientemente de ellos, la superficie del metal se transforma cambiando su aspecto y sobre todo sus propiedades mecánicas.

El anodizado es un proceso electroquímico en el cual se forma una fina película de óxido (capa anódica) controlada

por los perfiles de voltaje, que sirve para protegerlos del medio ambiente y a la vez sirve para decorarlos. Esta capa anódica es parte del metal.

Así, el proceso de anodizado consiste en obtener de manera artificial películas de óxido de mucho mayor espesor y con mejores características de protección que las capas naturales, estas se obtienen mediante procesos químicos y electrolíticos. Artificialmente se pueden obtener películas en las que el espesor es de 25 a 30 μm en el tratamiento de protección o decoración y de casi 100 μm con el procedimiento de endurecimiento superficial (*Anodizado Duro*).

Luego de esta pequeña introducción técnica podemos decir que el proceso de anodizado consiste en formar artificialmente una capa de óxido en la superficie del metal, este procedimiento llevado a cabo en un medio sulfúrico produce la oxidación del material desde la superficie hacia el interior, como dijimos anteriormente el material que produce la oxidación, es óxido de titanio, muy característico por su excelente resistencia a los agentes químicos, dureza, baja conductividad eléctrica y estructura molecular porosa, esta última junto con las anteriores, es la que nos permite darle una excelente terminación, características que la hacen adecuada y valiosa a la hora de elegir un medio de protección para este elemento.

Ventajas del anodizado

1. La capa de anodizado es más dura que las capas obtenidas pintando con resina sintéticas.
2. El anodizado no puede ser pelado ni escamado por cuanto la capa forma parte del metal base.
3. El anodizado le da al material una apariencia de superficie metálica muy superior a la que se puede lograr con pinturas orgánicas.
4. El anodizado no es afectado por la luz solar. Sin embargo, todos los recubrimientos orgánicos pueden eventualmente fallar debido a la exposición a los rayos ultravioletas
5. Espesor de capa controlada
6. Elevada dureza y resistencia a la abrasión
7. Gran resistencia a la luz UV

Anodizado de Titanio

El anodizado de Titanio, es una clase especial de tratamiento superficial para el Titanio que consolida y densifica las capas pasivas finas existentes, dando por resultado un espectro de los colores superficiales que se extienden del

color oro, pasando por toda la gama del arco iris, hasta llegar al color negro mate.

El anodizado de Titanio se realiza en una variedad de electrolitos. Donde los ácidos sulfúrico y fosfórico diluidos son utilizados ampliamente. El espesor de la capa anodizada depende del voltaje y no del tiempo de electrólisis o la densidad de corriente, por lo que el consumo de energía para llevar a cabo este proceso es bastante económico y por las características de la misma es de gran interés tecnológico.

El anodizado de Titanio es un proceso que ajusta el nivel del óxido de las superficies del metal. Este ajuste cambia el espectro de la luz, dando por resultado el color percibido. Especificando el espesor superficial del óxido, una gama entera de colores puede ser producida. El anodizado de Titanio no es una capa, ni utiliza los tintes.

Este proceso es comparable con la anodización de aluminio, solo que para el Titanio, no se aplica ningún colorante, por lo que es considerado como un proceso limpio.

Particularmente las capas adherentes son alcanzadas sumergiendo el objeto en una solución de ácidos fosfórico y/o sulfúrico y de aplicar una corriente directa. El objeto a anodizar se debe conectar como el ánodo (polo positivo). Una hoja del acero inoxidable o del titanio del mismo grado se puede utilizar como el cátodo (polo negativo).

La oxidación superficial se puede también realizar en una solución ácida fosfórica, en la cual el azul, amarillo y violeta pueden ser creadas con gran facilidad.

Las capas del color se adhieren firmemente al substrato y son resistentes a la abrasión. Los colores, ellos mismos siguen siendo constantes si la superficie se da una capa protectora transparente.

Las capas del óxido se pueden depositar en las capas brillantes y uniformemente coloreadas de la superficie de, virtualmente, cualquier material de Titanio, aunque las piezas sujetas a la oxidación anódica requieren cierto tratamiento previo para producir adherencia firme y uniforme. •

Nota

¹ Sustancia que tiene la propiedad de atraer la humedad del aire y lentamente convertirse en líquido.

JUAN LUIS PAREDES RAMÍREZ. Ingeniero Químico por la Unidad Iztapalapa de la UAM. Contacto: jopr_82@yahoo.com.mx.