

TITANIO Y ALEACIONES DE TITANIO, SU USO EN PARTES SOLDADAS EN LA INDUSTRIA ESPACIAL

José David Triana Acevedo
e-mail: j triana@abae.gob.ve

RESUMEN: El titanio junto sus aleaciones, es un metal estructural que es usado en la industria espacial debido a sus propiedades únicas como su alta resistencia específica, buena ductilidad, resistencia a la corrosión. Estas se conservan a altas temperaturas y a temperaturas criogénicas, es de gran utilidad en el ambiente espacial. El titanio y sus aleaciones forma microestructuras hcp llamadas α y bcc llamadas β , en la industria espacial se usan aleaciones α , cercanas a α y $\alpha+\beta$. El titanio tiene una afinidad muy fuerte con el oxígeno por lo que al momento de soldarse este debe ser protegido por un gas inerte tanto en la zona de fusión como en la zona afectada por el calor, por ello, se usa la soldadura GTAW o GMAW. Las precauciones que deben ser tomadas antes y durante la soldadura son de vital importancia para garantizar la soldadura de alta calidad requerida en las aplicaciones espaciales.

PALABRAS CLAVE: Titanio, Microestructura, Soldadura, Defectos en la soldadura.

1 INTRODUCCIÓN

El titanio fue descubierto en 1790 pero no pudo ser purificado hasta el 1900. Este no fue ampliamente usado hasta la segunda mitad del siglo veinte. Sin embargo se tiene experiencia en el uso del titanio en los últimos 50 años en el diseño y conformado de partes fabricadas en este metal.

El titanio en verdad no es una sustancia tan rara como aparenta, es el cuarto metal estructural más abundante en la corteza terrestre excedido sólo por aluminio, hierro, y magnesio. Desafortunadamente, se encuentra rara vez en concentraciones altas y nunca en estado puro. Así que las dificultades para procesar el metal lo hace costoso.

Las aleaciones de titanio tienen propiedades mecánicas que lo hacen un material ideal en muchas aplicaciones estructurales tiene una alta resistencia específica, una excelente resistencia a la corrosión, un bajo coeficiente de expansión térmico, baja permeabilidad magnética y alta dureza. Esto es de gran utilidad en aplicaciones como el sector espacial, industrial, química e ingeniería médica, además, el titanio conserva su resistencia específicas a temperatura que otros materiales estructurales no lo hacen. Al visualizar la Fig. 1, solo a temperaturas menores a 550 K la fibra de carbono tiene una resistencia específica mayor la de las aleaciones de titanio, a temperaturas mayores las aleaciones de titanio y TiAl poseen una resistencia específica mayor que las aleaciones de Al, los aceros y

súperaceros, esto hace que las aleaciones de titanio y TiAl sean ideales en aplicaciones estructurales donde se necesite un material de baja densidad y alta resistencia que trabaje entre los 550K y 1250K.

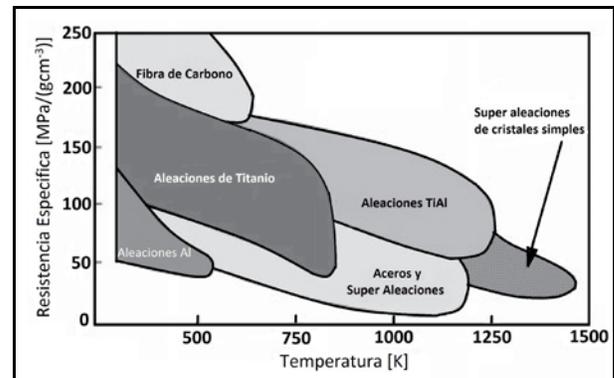


Figura 1. Resistencia específica Vs Temperatura de trabajo de materiales estructurales comparado con aleaciones de titanio. [1]

Estas propiedades tan únicas en el titanio y las aleaciones de titanio, son de gran utilidad para la industria espacial ya que las condiciones del ambiente espacial son extremas comparada con una aplicación terrena. Por tal motivo en este Paper se indica cual es el comportamiento de la soldadura de titanio y aleaciones de titanio basándose en la aplicación espacial.

2 ESTRUCTURA CRISTALINA DE LA ALEACIONES DE TITANIO

Como otros metales, el titanio tiene varias estructuras cristalinas, sin embargo, cada una es estable solo dentro de un rango particular de temperatura. La completa transformación de una estructura en otra estructura de cristal es llamada transformación alotrópica; la temperatura de transformación es llamada traza de temperatura.

El titanio puro, así como también la mayor parte de las aleaciones de titanio, se cristaliza en bajas temperaturas en una estructura hexagonal compacta (hcp por sus siglas en inglés) llamada titanio α . Sin embargo, a alta temperatura la estructura cubica de cuerpo central (bcc por sus siglas en inglés) es estable y es llamada titanio β . La temperatura de traza β , que es la temperatura a la que se forman los cristales β , para el titanio puro es 882°C. Las celdas atómicas unitarias de la estructura hexagonal compacta (hcp) titanio α y la estructura cubica de cuerpo centrado titanio β son especificado en la Fig. 2. La existencia dos diferentes estructuras cristalinas y las correspondientes

temperaturas alotrópicas de transformación es de gran importancia para sentar las bases para una gran variedad de propiedades que tienen las aleaciones de titanio. [1].

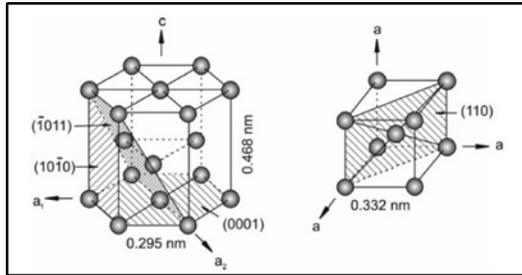


Figura 2. Estructura cristalina de hcp α y bcc β [1]

La deformación plástica esta cercanamente vinculadas con la respectiva estructura cristalina, demás, la red cristalina hexagonal causa una anisotropía distintiva del comportamiento mecánico para el Titanio α , es decir, que las propiedades mecánicas del material varían dependiendo de la dirección en la que son analizadas, esto debido a la asimetría en algunas direcciones de las estructuras cristalinas hcp. [2] El módulo de Young del titanio de cristales simples varía entre 145GPa en el plano basal vertical y solo 100GPa en el plano paralelo. [1]

Las aleaciones de titanio son comúnmente separadas en cuatro categorías, referidas anormalmente a la fase presente y son llamadas:

- Alfa (α).
- Cercana al Alfa.
- Alfa más Beta ($\alpha+\beta$).
- Beta (β).

Algunas veces las categorías cercana a β es tomada en cuenta. Estas categorías denotan el tipo general de microestructura después del proceso de conformado de la aleación de titanio (Microestructura se refiere a las fases y la estructura del grano presente en un componente metálico.) Las categorías listadas describen el origen del microestructura en términos de la estructura de cristalina básica favorecida por la composición de la aleación, así, una aleación que solo presenta una fase alfa se convierte en una aleación alfa. La estructura de cristalina y la estructura del grano no son términos sinónimos, ambos deben estar especificados para identificar completamente el comportamiento de la aleación y sus esperadas propiedades mecánicas y físicas, cuando el metal se solidifica forma sus estructuras cristalinas en forma de granos (Ver Fig. 3) y del tamaño de estos granos dependen las propiedades del metal.

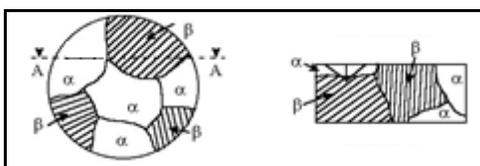


Figura 3. Tamaño de grano y microestructura. Fuente: <http://www.upv.es/materiales/>

El hecho importante a tener en cuenta es que, mientras la forma y tamaño de grano afectan el comportamiento de la aleación, los cambios de estructura de cristal (de alfa para la beta y de regreso otra vez) que ocurren durante el proceso de conformado juegan un papel mayor en las propiedades finales del material. [3]

La relación entre las fases en un sistema de aleación puede ser representada gráficamente en un diagrama de fases. En la Fig. 4, se muestra la composición de algunas aleaciones de titanio bajo los estándares Americanos. Este es un diagrama de fase pseudobinario donde el eje de las abscisas representa la cantidad de elemento que se estabiliza en fase β y en de las ordenadas la temperatura. El diagrama claramente muestra que las aleaciones como Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo son aleaciones cercanas a α porque están muy cerca de la región α y dentro de la región β del diagrama de fase. Las aleaciones como Ti-13V-13Cr-3Al, sin embargo, están claramente en el extremo superior de la región de $\alpha+\beta$ y a causa de la cinética lenta de transformación, permanecerá beta al enfriarse a temperaturas más altas. [3]

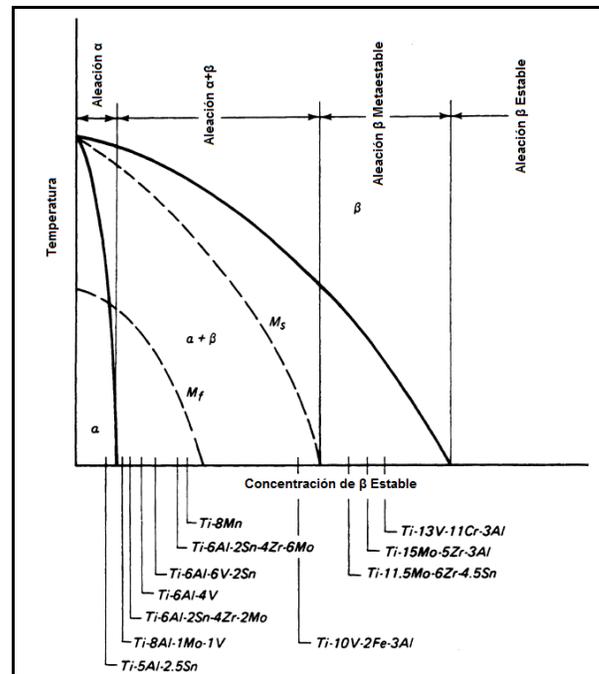


Figura 4. Diagrama de Fases para Aleaciones de Titanio. [3]

Una aleación α normalmente no forma fase beta en calentarse. Una aleación cercana a α forma sólo una cantidad limitada de fase β al calentarse, y pueden aparecer microestructuras similares a aleación α a temperaturas más bajas. Una aleación $\alpha+\beta$ permite la completa transformación de β al calentarse pero una parte de este β se transforma de vuelta en alfa a temperaturas más bajas. La aleación cercana a β tiende a retener indefinidamente a bajas temperaturas la fase β formada a altas temperaturas. Sin embargo, los β

formados en el enfriamiento inicial a temperatura ambiente son metaestables [3], es decir, que permanecen en el tiempo experimentando cambios imperceptibles. [4]

3 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES DE TITANIO

Hoy más de 100 aleaciones de titanio son conocidas, de las cuáles, sin embargo, sólo 20% o 30% han alcanzado estatus comercial. De estos, el Ti-6Al-4V clásico cubre más que 50% de uso. Según la microestructura las aleaciones de titanio se clasifican en aleaciones α , aleaciones cercanas a α y aleaciones $\alpha+\beta$

Las aleaciones α son primordialmente usadas en el producto químico y la industria de ingeniería de proceso. Aquí el comportamiento excelente de resistencia a la corrosión y la deformación son de preocupación primaria mientras la alta resistencia específica sólo está en un segundo plano.

Las aleaciones cercanas al α son las aleaciones de alta temperatura clásicas. Esta clase de la aleación es ideal para altas temperaturas y combinan la excelente ductilidad de las aleaciones α con la alta resistencia de las aleaciones $\alpha+\beta$. Hoy su superior temperatura de trabajo se le limita a cerca de 500°C a 550°C.

Entre las aleaciones $\alpha+\beta$ está la Ti-6Al-4V es por mucho la aleación de titanio más popular. Más que 50% de todas las aleaciones en uso hoy están bajo esta composición. La aleación fue desarrollada en los inicios de 1950s en los Estados Unidos en el Instituto de Tecnología de Illinois y es la primera aleación de titanio comercial en hacerse. Hay dos razones para el éxito de Ti-6Al-4V. Primero, la homogeneidad de sus propiedades. En segundo lugar, es la aleación más intensivamente desarrollada y probada, que es su ventaja principal, especialmente en la industria aeroespacial, el usuario más grande de la Ti-6Al-4V. [1]

4 SOLDABILIDAD

Según la AWS (American Welding Society) define una soldadura como "una coalescencia localizada (la fusión o unión de la estructura de granos de los materiales que se están soldando) de metales o no metales producida mediante el calentamiento de los materiales a las temperaturas de soldadura requeridas, con o sin la aplicación de presión, o mediante la aplicación de presión sola y con o sin el uso de material de aportación." [5]

El titanio tiene una afinidad química fuerte con el oxígeno, por lo que en las superficies limpias se forma una capa de óxido rápidamente, incluso en la temperatura ambiente. Este comportamiento conduce a una pasividad natural que provee un grado alto de resistencia a la corrosión. A medida que aumenta la temperatura también lo hace el espesor de la capa

superficial. Cuando la temperatura excede los 500 ° C, la resistencia a la corrosión de titanio puro se desploma y, el metal se vuelve altamente susceptible a fragilizarse por el oxígeno, nitrógeno, e hidrógeno, que se disuelve entre los interespacios de la microestructura del titanio. Por consiguiente, el derretimiento, solidificación, y el enfriamiento en estado sólido asociado con soldadura debe ser realizado en un ambiente completamente inerte o en un ambiente de vacío.

Se acostumbra que la temperatura de trabajo durante la soldadura esté bajo el rango beta-alfa, aproximadamente arriba de los 538 ° C, por arriba de la temperatura de fusión de los elementos aleantes respectivos. Las microestructuras formadas por la solidificación pueden surgir en el área de la soldadura. Las microestructuras pueden formarse en la zona de fusión de la soldadura o en la zona afectada por el calor (HAZ por sus siglas en ingles) de una juntura soldada, debido a mantenerse a altas temperaturas o debido a las lentas velocidades de enfriamiento.

Como el titanio es un material muy reactivo, las consideraciones especiales son requeridas antes y durante la soldadura para asegurar juntas exitosas y con resistencia aceptable. Las aleaciones de titanio pueden ser exitosamente soldadas para aplicaciones que se extienden desde niveles bajo cero hasta temperaturas elevadas cuando las precauciones correctas son tomadas.

Como las soldaduras de las aleaciones de titanio son comúnmente usadas en aplicaciones donde la fatiga es crítica, una operación de alivio de esfuerzos es generalmente requerida luego de la soldadura esto se hace realizando un tratamiento térmico. La temperatura de recosido específicas y las veces dependen de la aleación. Tres condiciones principales necesitan ser consideradas en la soldadura de titanio:

- Los elementos situados en los interespacios de una micro estructura perjudiciales deben quedar excluidos de la región unida.
- Los contaminantes debe quedar excluido de la región unida.
- Los perjudiciales cambios de fase deben ser evitados para mantener ductilidad en la unión.

El titanio puro y las aleaciones α de titanio tienen buena soldabilidad porque son insensibles a los tratamientos térmicos lo que permite la formación de las microestructuras deseadas. Tienen buena soldabilidad debido a su buena ductilidad.

Las operaciones de soldado tienen poco efecto en las propiedades mecánicas de material en la zona afectada en calor. En la soldadura de aleaciones para trabajo en frío templadas en la HAZ se perjudica la resistencia de la aleación. Por consiguiente, todas las aleaciones de titanio α y titanio puro para trabajo en frío se sueldan con el material templado y se recomienda hacer una operación para aliviar tensiones.

Las aleaciones $\alpha+\beta$ soldadoras pueden cambiar significativamente su resistencia, su ductilidad, y su

dureza característica como resultado del ciclo térmico al que es expuesto. En muchas aleaciones $\alpha+\beta$ se puede tener como resultado una ductilidad baja, esta es causada por la transformación de fases.

En contraste al titanio sin aleaciones y las aleaciones α para el trabajo en frío, las aleaciones $\beta+\alpha$ (y las β) pueden ser fortalecidas por el tratamiento térmico; este factor le añade una complicación a la elección de un proceso de soldado.

Aunque las aleaciones $\beta+\alpha$ sea soldable, las aleaciones $\beta+\alpha$ fuertemente estabilizadas en β son difíciles de soldar y estas son generalmente quebradizas al soldarse. La ductilidad más baja de la soldadura de la mayoría de aleaciones $\beta+\alpha$ es causada por transformaciones de fase en el metal de la soldadura o la zona afectada en calor, o ambos.

Las aleaciones $\beta+\alpha$ pueden ser soldadas con aporte de titanio puro o con aporte de aleación de titanio α para producir un metal de soldadura que está bajo la fase beta. Donde la fuerza no es crítica y más dureza es deseada, los metales de aporte de titanio sin aleantes pueden ser usados. El uso de metales de aporte puede mejorar ductilidad del metal solidificado de la soldadura pero no puede prevenir el agrietamiento en la HAZ en aleaciones susceptibles. [3]

5 SOLDADURA DE TITANIO EN LA INDUSTRIA ESPACIAL

Las soldaduras GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) y GMAW (Gas Metallic Arc Welding) son usadas en el sector aeroespacial que requiere una soldadura de arco eléctrico de gran calidad y con requerimientos especiales por la naturaleza de la aplicación. Las secciones más grandes generalmente requieren el uso de metal de aporte y juntas surcadas. Ya sea GTAW o GMAW. Si el proceso del GTAW es usado, se debe tener especial cuidado en evitar el contacto del electrodo de tungsteno con el baño de fusión (área de material derretido) para prevenir la contaminación por tungsteno. Los electrodos de tungsteno de diámetro pequeño sirven para aleaciones de titanio. Para soldadura GMAW la velocidades de la soldadura es rápida y el baño de fusión es relativamente grande y agitado, así que la protección óptima con gases inertes es requerida. La corriente usada para este tipo de soldadura es DC (corriente directa por sus siglas en ingles). Usualmente, el material de aporte corresponde a las propiedades y la composición del titanio que se va a soldar.

El gas protector es de importancia central para la calidad de la soldadura. Como el titanio reacciona con la atmósfera, todas las partes a una temperatura superior a los 300 °C deben ser provista de un escudo protector de gas. Por consiguiente, durante la GTAW y GMAW, el blindaje de argón o de helio (pureza de 99.99%) se usan como gases de protección con un punto de rocío de -45°C o más bajos, estos proveen la protección necesaria. Tres suministros separados del gas se necesitan para la protección, secundaria o "de arrastre",

la protección en la zona de enfriamiento de la soldadura y en la HAZ y protección en la zona trasera de la soldadura. El argón usado debe ser de la pureza más alta disponible. Para evitar defectos de la soldadura, el área de la soldadura debe ser limpiada de contaminantes de la superficie directamente antes de soldarse usando lijado, cepillado, desengrasado y sumergiendo en soluciones. Después del proceso de limpieza, las partes a ser soldadas y el material de aporte deben ser tratados con tela y guantes libre de fibras. Las manos desnudas nunca deben usarse para manipular titanio limpio, debido a que el sudor de las manos puede contaminar la soldadura.

Una cámara de purga es una forma de rodear el titanio con gas inerte en el caso de partes pequeñas. Las cámaras de purga es una burbuja usualmente plástica en forma de domo grande con puertos de acceso para la antorcha. Como el argón es más pesado que la atmósfera circundante este cae al fondo de la cámara y hace subir el aire más liviano y este sale a través de una válvula en lo alto de la cámara. (Ver Fig. 5)



Figura 5. Cámara de purga (Fuente: www.hodrod.com)

La inspección una vez soldada es de vital importancia, la visualización de la soldadura puede mostrar si los contaminantes están presentes. Una soldadura de color plata brillante indica ausencia de contaminantes. Un color dorado o similar muestra que algún agrietamiento está presente. La prueba de dureza es la manera más segura de medir la condición de la soldadura. Una buena soldadura sólo debería mostrar un incremento leve en la dureza con respecto al metal antes de ser soldado. Usualmente, los tratamientos térmicos no son requeridos y se recomienda sólo para componentes de gran espesor, o partes complejas donde múltiples soldaduras fueron aplicadas. [1]

6 PROPIEDADES DE LA MICROESTRUCTURA DE LA SOLDADURA

Durante la realización de la soldadura en aleaciones de titanio se presentan dos áreas, la FZ (zona de fusión por sus siglas en ingles) y la HAZ (ver

Figura 6), en la FZ la temperatura de fusión de la aleación (T_m) de titanio es excedida, y al enfriarse se forman granos gruesos. Los límites de la HAZ son dados por la temperatura de fusión y la temperatura de traza de β (T_β). Debido al gradiente de temperatura en esta zona se forma una estructura laminar durante el enfriamiento que va de granos más grandes en T_m a granos más pequeños en T_β .

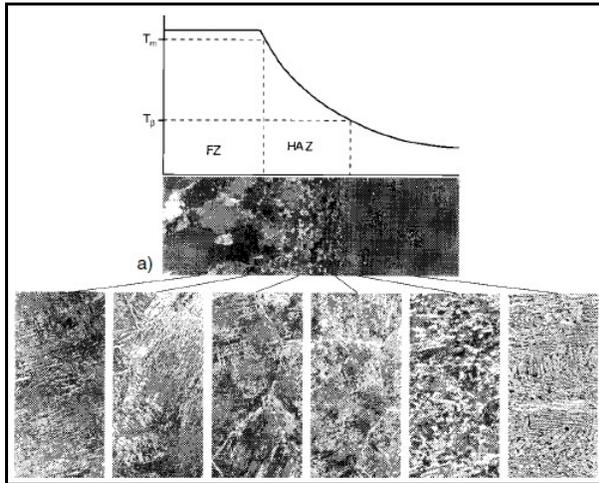


Figura 6. Formación de FZ y HAZ después de soldadura TIG de una aleación de titanio $\alpha+\beta$. Fuente: [1]

Los componentes de las aleaciones y la microestructuras determinan la soldabilidad de las aleaciones de titanio. El titanio puro y las aleaciones α son fáciles de soldar. Generalmente, las aleaciones de titanio convencionales pueden llegar a ser fáciles de soldar cuando se incrementa la cantidad de fase α . Usualmente, las aleaciones $\alpha+\beta$ son soldadas y tratadas térmicamente para homogenizar el tamaño de grano en la HAF y FZ. Soldar titanio con otros metales generalmente representa una gran dificultad debido a la formación de grietas que causan la formación de fases intermetálicas. Las propiedades mecánicas de la zona soldada rara vez alcanzan los valores del material base. Típicamente la resistencia a la tracción, ductilidad y la fatiga son reducidos. [1]

7 DEFECTOS EN LA SOLDADURA

En muchas aleaciones, la soldabilidad está determinada por la capacidad de la aleación para producir una soldadura que esté libre de discontinuidades o defectos. Los defectos que pueden ser encontrados cuando se sueldan aleaciones de titanio principalmente son la segregación (macrosegregación y la microsegregación), grietas por solidificación, grietas por contaminación.

Durante la etapa de solidificación, la existencia de partición de los diferentes solutos entre el líquido y el sólido en formación, da origen a inhomogeneidades químicas llamadas segregación. [6]

La macrosegregación en piezas soldadas se define como la segregación que se extiende a lo largo de una distancia determinada que muestra varios diámetros del grano. En piezas de aleación de titanio la macrosegregación ocurre primordialmente en forma de agrupación del soluto transversal. Este soluto-enriquecido o soluto-acabado enriquecido normalmente aparecen con forma de contornos curvilíneos en la pieza soldada y son atribuidos por variaciones termales producto de la piscina de la soldadura, que periódicamente cambian la velocidad de la interfaz solido-liquido.

la microsegregación se presenta cuando las condiciones de solidificación fuera de equilibrio experimentadas durante la soldadura dan como resultado un rompimiento del avance de la interfaz solido-liquido dentro de la estructura celular, dendríticas celular, y dendríticas sub estructurales. La microsegregación es más evidente en las aleaciones β estables que en las $\alpha+\beta$. Este comportamiento es debido primero alto nivel de la aleación y la ausencia de una estructura transformada en la zona de fusión β completamente retenida.

Las grietas por solidificación se presentan en muchas otras aleaciones estructurales, como las aleaciones aluminio y muchos aceros inoxidable austeníticos, las aleaciones de titanio generalmente no son consideradas susceptibles a la presencia de grietas en la zona de fusión. Sin embargo, bajo las severas condiciones de restricción, las grietas por solidificación a lo largo de linderos betas del grano pueden ocurrir. Algunos trabajos de investigación en aleaciones de aluminio indican que las grietas por solidificación deben ser consideradas al diseñar juntas en componentes estructurales de aleaciones de titanio-aluminio. Sin embargo, esta observación generalmente está en conflicto con la resistencia excelente del agrietamiento conocido de la aleación. La restricción experimental y las condiciones de tensión dramáticamente pueden alterar percepciones de resistencia de la grieta.

Cuando el titanio es expuesto al aire, la humedad o los hidrocarburos a temperaturas que exceden los 500°C (930°F) aparecen grietas por contaminación, el material fácilmente recoge oxígeno, nitrógeno, carbono e hidrógeno. Estos átomos pequeños de los elementos se sitúan en los interespacios de la microestructura entran en la red cristalina en forma monoatómica y migrarán para sitios situados en los interespacios de un tejido (los sitios localizados entre átomos de titanio). Estos elementos situados en los interespacios de un tejido inhiben la deformación plástica e incrementan la resistencia, pero causan una pérdida sustancial en la ductilidad.

Si los niveles de contaminación exceden una cierta cantidad, el agrietamiento puede suceder por el estrés generado durante soldadura. Los niveles de oxígeno por el orden de 3000 ppm en la soldadura pueden dar como resultado agrietamiento transversal, con la fase α siendo en particular susceptibles para la contaminación. Las grietas por contaminación pueden ser evitadas

minimizando exposición de la piscina derretida de la soldadura y la región caliente de la soldadura a los elementos contaminantes. Esto es logrado limpiando totalmente las piezas antes de ser soldadas, logrando proteger las piezas a ser soldadas usando un gas inerte, usando gas del blindaje con un suficientemente bajo punto de rocío. [3]

8 PRECAUCIONES DURANTE LA REALIZACIÓN DE LA SOLDADURA

Para lograr la producción de soldaduras de titanio y aleaciones de titanio de alta calidad como las que se usan en el área espacial, se debe realizar una limpieza detenida de las piezas de trabajo durante el periodo de presoldadura y se debe proveer de la protección de las áreas de alta temperatura con el uso de gases inertes.

Las aleaciones de titanio generalmente solo requieren sólo la remoción de grasa, aceite, y la suciedad de la superficie. El procedimiento de limpieza depende de si las capas de óxido en el área de la soldadura son ligero o grueso. La limpieza leve es normalmente lograda pasando un paño con un solvente como acetona de etilo de metilo (MEK por sus siglas en ingles).

Los solventes tratados con cloro, no deberían usarse para desengrasar aleaciones de titanio porque los residuos de cloro causan ataque intergranular en subsiguientes operaciones de calentamiento. Todo manejo debe ser realizado por completo con guantes blancos.

Los materiales que exhiben un óxido ligero se descama como resultado del tratamiento térmico debajo de los 600°C ya que contiene aceite de las operaciones de mecanizado, debería ser sumergido de 5 a 10 min en una solución de 30% a 40% de ácido nítrico con 2% a 4% de ácido fluorhídrico en agua a temperaturas entre 20°C y 70°C. Los métodos alternativos sugieren que la limpieza química puede ser realizada sumergiendo entre 1min a 20min en soluciones que contienen 20% a 47% ácido nítrico con 2% a 4% ácido fluorhídrico en agua entre los 27°C a 71°C. Las partes sumergidas deben ser enjuagadas en agua, secadas y envueltas en plástico limpio.

La limpieza también debe ser para el metal de aporte de la soldadura que se ha contaminado debido al inadecuado manejo o almacenamiento. Desengrasar la varilla para soldadura o el alambre es necesario para eliminar subsiguientes problemas de contaminación de la soldadura.

El blindaje efectivo de la zona de la soldadura de la atmósfera durante la soldadura es sumamente importante, asegura la máxima ductilidad de la soldadura, dureza y reduce la posibilidad de aparición de grietas por solidificación. Las condiciones óptimas del blindaje son provistas soldándose dentro de una cámara de purga que ha sido evacuada y purgada con argón con un punto de rocío de -24 ° C.

Afortunadamente, la evidencia de la existencia de contaminantes en la soldadura de titanio se puede verificar fácilmente por el color de la superficie de la soldadura, con un cambio que va desde el plata brillante que es aceptable en el industria espacial pasando por el magenta y finalizando e azul indican un aumento en el nivel de contaminantes. La contaminación aguda es asociada con una superficie blanca o gris y está a menudo acompañada por agrietamiento de estado sólido en el metal soldado. [3]

9 COCLUSIONES

Con el fin de dar a conocer el uso del titanio y sus aleaciones en la industria espacial en piezas soldadas se analizó el comportamiento a nivel microestructural y granular. El conocimiento del comportamiento de la microestructura es de vital importancia, puesto que esta afecta directamente las propiedades del material y al realizar la soldadura esta se puede modificar. Igualmente sucede con el tamaño de grano por ello es de gran importancia diseñar la soldadura para que estos fenómenos no afecten las propiedades del material.

Debido a la fuerte compatibilidad del titanio y sus aleaciones con el oxígeno, este se oxida muy rápido durante la soldadura por ello debe protegerse con un gas inerte. En la industria espacial es recomendable el uso de una cámara de purga, cámara de vacío o de agregar gas adicional en la zona trasera del cordón de la soldadura para así evitar cualquier contacto de la soldadura con el ambiente.

Otro factor a tener en cuenta es la limpieza antes de la soldadura debido a los altos requerimientos de calidad en la industria espacial cualquier contaminante es inaceptable.

10 REFERENCIAS

- [1] C. Leyens y M. Peters, Titanium and Titanium Alloys Fundamentals and Applications, 2003.
- [2] R. Hibbeler, Mecánica de materiales, Mexico, 2006.
- [3] M. J. Donachie, Titanium A Thechnical Guide, Ohio: ASTM International, 2000.
- [4] W. D. Callister, Introduccion a la ciencia e ingenieria de los materiales, Volumen 1.
- [5] L. Jeffus, Soldadura: Principios y aplicaciones, Madrid , 2009.
- [6] W. Aguilar , *Comportamiento a la segregación de los elementos de aleación usados en fundiciones esferoidales de fabricación comercial*, Trujillo, Peru: Departamento de Física - Universidad Nacional de Trujillo. Ciudad Universitaria S/N., 2000.