



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTILÁN

ESTRUCTURA CARACTERÍSTICA DEL
TITANIO PURO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

FELIPE NERI PEREZ ROLDAN

ASESOR: DR. HECTOR ENRIQUE CURIEL REYNA

CUAUTILAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

200E



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres Anastasio Pérez Gachuz y Carmen Roldán Ríos por haberme dado la oportunidad de vivir libremente y por el apoyo brindado a lo largo de mi vida, a mis hermanos y a mi familia en general por que sé que siempre estuvieron apoyándome y por creer en mi.

Agradezco también al C.Dr. Tomas Rangel Ortiz por el apoyo brindado para la realización de este trabajo, y especialmente al Dr. Héctor Enrique Curiel Reyna por el apoyo, asesoría y por los consejos brindados para la culminación de este trabajo y mi desarrollo profesional.

A todos mis profesores, compañeros y amigos con los que compartimos buenos y malos momentos, pero que a pesar de todo siempre estuvimos apoyándonos.

A la UNAM, por darme la oportunidad de ser parte de su historia, y por ser formadora de profesionistas y de excelentes seres humanos.

A todos las personas que han formado parte de mi vida, y que saben que esto, solo es el principio.....

Mis gracias eternas.

Por mi raza hablara el espíritu

“Este trabajo es un reconocimiento
al trabajo, la constancia,
el esfuerzo, la dedicación,
la disciplina y al amor
por todo aquello que pueda dar
satisfacciones a tu existencia
en este mundo.....”

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO	4

CAPITULO 1

TITANIO PURO

1.1 Titanio puro	6
1.2 Características físicas	8
1.3 Características mecánicas	11
1.4 Características químicas	13
1.5 Conformado del titanio	15

CAPITULO 2

PRODUCCION DEL TITANIO

2.1 Extracción del titanio esponja	19
2.2 Proceso Kroll	19
2.3 Proceso Hunter	22
2.4 Preparación de lingotes	23
2.5 Funcionamiento primario	25
2.6 Terminado del lingote	26

CAPITULO 3

ALEACIONES

3.1 Aleaciones	28
3.2 Aleaciones α	34
3.3 Aleaciones β	36
3.4 Aleaciones α - β	39

CAPITULO 4

APLICACIONES

4.1 Biomédicas	43
4.2 Industria energética	45
4.3 Industria de procesos químicos	46
4.4 Industria automotriz	47
4.5 Industria militar	48
4.6 Industria aeronáutica y espacial	49
4.7 Construcción naval	49
4.8 Industria relojera	50
4.9 Joyería y bisutería	51
4.10 Industria deportiva	51
4.11 Decoración	52

CAPITULO 5

METALURGIA DEL TITANIO

5.1 Procesos tecnológicos	54
5.1.1 Fundición	54
5.1.2 Forja	55
5.1.3 Soldadura	55
5.1.4 Extrucción	57
5.1.5 Embutición	57
5.1.6 Mecanizado	58
5.1.7 Fresado químico	58
5.1.8 Rectificado de precisión	58
5.1.9 Pulvimetalurgia	58
5.2 Tratamientos del Titanio	60
5.2.1 Tratamiento termoquímico:Nitruración	60
5.2.2 Tratamiento superficial	60

CAPITULO 6 METALOGRAFIA

6.1 Metalografía	64
6.2 Examen microscópico de los metales	65
6.3 Tamaño de grano	67
6.4 Clasificación de los tamaños de grano	67

CAPITULO 7 DESARROLLO EXPERIMENTAL

7.1 Desarrollo experimental	70
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	86
CONCLUSIONES	87
GLOSARIO	88
BIBLIOGRAFÍA	93



INTRODUCCION

El Titanio y sus aleaciones son metales relativamente nuevos de la ingeniería puesto que tienen funcionando como materiales estructurales solamente desde 1952. El Titanio (llamado así por los Titanes, hijos de Urano y Gea en la mitología griega) fue descubierto en Inglaterra por William Gregor en 1791, cuando estudiaba un metal de color gris-plata que había encontrado. Poco después en 1795, el químico austriaco Martín Kalprotz, descubridor también del uranio, le dio el nombre de Titanio.

Este elemento es, en cuanto a su abundancia, el noveno de los que forman la corteza terrestre.

Virtualmente, todas las rocas ígneas, y sus sedimentos, así como muchos minerales, principalmente los que contienen hierro y todos los organismos vegetales y animales, contienen Titanio.

El mineral más importante del que se extrae el Titanio es el rutilo (óxido de Titanio), muy abundante en las arenas costeras. Por su parte el Titanio debe ser sometido previamente a un proceso metalúrgico de refinado, para prevenir su eventual reacción con sustancias gaseosas, tales como el nitrógeno, el oxígeno y el hidrógeno.

Mathew A. Hunter preparó por primera vez Titanio metálico puro (con una pureza del 99.5%) calentando tetracloruro de Titanio ($TiCl_4$) con sodio a 650-750 °C en un reactor de acero.

La obtención del metal es difícil, debido a su gran reactividad con el oxígeno, nitrógeno y carbono, a temperaturas elevadas. Esto ha motivado que no haya sido posible su producción como Titanio puro hasta principios del siglo XX.

El Titanio como metal no se usó fuera del laboratorio hasta que en 1946 William Justin Kroll desarrolló un método para poder producirlo comercialmente, mediante la reducción del $TiCl_4$ con magnesio, y este método, llamado Método de Kroll, es el utilizado aún hoy en día (2007).



En este proceso el metal se mantiene constantemente en una atmósfera de gas inerte, como argón o helio, que inhibe la reacción con cualquier otro elemento.

La producción industrial empezó en 1948, con tres toneladas, siendo su consumo actual de unas 160.000 toneladas anuales, con un ritmo de crecimiento anual del 7% aproximadamente.

Los países productores de Titanio metálico son Rusia, Estados Unidos, Japón, Reino Unido y China, siendo su consumo principalmente en la industria aeronáutica, del 50 al 75% en Estados Unidos o en la CEE, con la única excepción de Japón que destina de un 80 a un 90% en aplicaciones industriales.

La mayor crisis que ha conocido la industria aeronáutica al principio de la década de los 90 ha llevado a la fusión de las grandes empresas productoras de Titanio, con lo cual el precio medio de los semiproductos ha caído un 30% entre 1990 y 1995, si bien aun es relativamente elevado.

Durante los años 50 y 60 la Unión Soviética promovió el empleo de Titanio para usos militares y submarinos (Clase Alfa y Clase Miguel) como parte de sus programas militares relacionados con la guerra fría. En los EE.UU. el Departamento de Defensa (DOD) comprendió la importancia estratégica del metal y apoyó los esfuerzos para su comercialización. A lo largo del período de la guerra fría, el gobierno estadounidense consideró al Titanio como un material estratégico, y las reservas de Titanio esponja fueron mantenidas por el Centro de Reservas Nacional de Defensa, que desapareció en 2005. Hoy el mayor productor mundial es el consorcio ruso VSMPO-AVISMA, que representa aproximadamente el 29% de la cuota mundial de mercado.

En 2006, la Agencia de Defensa estadounidense concedió 5,7 millones de dólares a un consorcio de dos empresas para desarrollar un nuevo proceso para fabricar polvo de metal de Titanio. Bajo calor y presión, se puede usar el polvo para crear artículos fuertes, de peso ligero en las superficies de revestimiento de armaduras o componentes para el espacio aéreo, el transporte e industrias de tratamiento químico.



Productores mundiales de Titanio

País	Miles de toneladas	% del total
Australia	1291,0	30,6
Sudáfrica	850,0	20,1
Canadá	767	18,2
Noruega	382,9	9,1
Ucrania	357	8,5
Total de los 5 países	3647,9	86,4
Total mundo	4221,0	100,0

Tabla 1.1. Principales productores de óxido de Titanio en 2006. Cifras del 2006, en miles de toneladas de dióxido de Titanio. Fuente: L'état du monde 2007, annuaire économique géopolitique mondial.

El Titanio es el noveno elemento más abundante en la corteza terrestre (supone el 0,63% del peso total). Sin embargo, en la naturaleza siempre se encuentra unido químicamente a otros elementos, formando minerales en los que la fracción de Titanio suele ser pequeña.

De todos los minerales de Titanio, solo el rutilo y la ilmenita son explotables económicamente y esto sólo cuando la concentración de Titanio es suficientemente alta.

Existen depósitos significativos de Titanio en forma de ilmenita en Australia occidental, Canadá, Nueva Zelanda, Noruega y Ucrania. Se extraen grandes cantidades de rutilo en Norteamérica y Sudáfrica. Las reservas conocidas de Titanio se estiman en unas 600 millones de toneladas (expresadas como TiO_2).



OBJETIVO

Conocer la estructura característica del Titanio puro y las fases existentes dentro de este, además de estudiar su composición química, de los diferentes tipos de aleación que se encuentran en él.

Describir de una manera específica, el procedimiento para el estudio de la Metalografía del Titanio puro, explicando detalladamente las actividades realizadas, apegados a optimizar el desarrollo y estudio de la Metalografía, con la finalidad de apreciar claramente el tipo de estructura característica en el Titanio y sus diferentes fases presentes.

Observar y mostrar la importancia del Titanio puro, así como sus características más importantes para el aprovechamiento de estas, en los diferentes sectores de aplicación, para optimizar más su uso y estudio, de dicho elemento.



Estructura característica del Titanio puro



CAPITULO 1

TITANIO PURO



1.1 Titanio puro

El Titanio es un elemento químico, de símbolo Ti y número atómico 22. Se trata de un metal de transición de color gris plata (Figura 1.1). Comparado con el acero, con quien compite en aplicaciones técnicas, es mucho más ligero (4,5/7,8) y tiene alta resistencia a la corrosión y gran resistencia mecánica, pero es mucho más caro que el acero, lo cual limita su uso industrial.

Es un metal abundante en la naturaleza; se considera que es el cuarto metal estructural más abundante en la superficie terrestre y el noveno en la gama de metales industriales. No se encuentra en estado puro sino en forma de óxidos, en la escoria de ciertos minerales de hierro y en cenizas de animales y plantas. Su utilización se ha generalizado con el desarrollo de la tecnología aeroespacial, donde es capaz de soportar las condiciones extremas de frío y calor que se dan en el espacio y en la industria química, por ser resistente al ataque de muchos ácidos; así mismo, este metal tiene propiedades biocompatibles, porque los tejidos del organismo toleran su presencia y por tanto permite fabricar muchas prótesis e implantes de este metal.

Posee propiedades mecánicas parecidas al acero, tanto puro como en las aleaciones que forma, y por tanto compite con el acero en muchas aplicaciones técnicas, especialmente con el acero inoxidable.

El Titanio comercialmente puro sin impurezas, es a partir del 99.0 a 99.5% Ti. Los elementos principales presentes en el Titanio sin impurezas son fierro y los elementos intersticiales, carbón, oxígeno, nitrógeno, e hidrógeno. El Titanio comercialmente puro se puede considerar una aleación de fase α en la cual el contenido en oxígeno determina el grado y la resistencia. El oxígeno está presente a cierto nivel del Titanio esponja, pero su cantidad se puede ajustar para modificar la resistencia del Titanio comercialmente puro. A este respecto, el oxígeno es un importante “elemento de aleación.” El carbón, el nitrógeno, y el hidrógeno están presentes como impurezas dentro del Titanio.



Estructura característica del Titanio puro

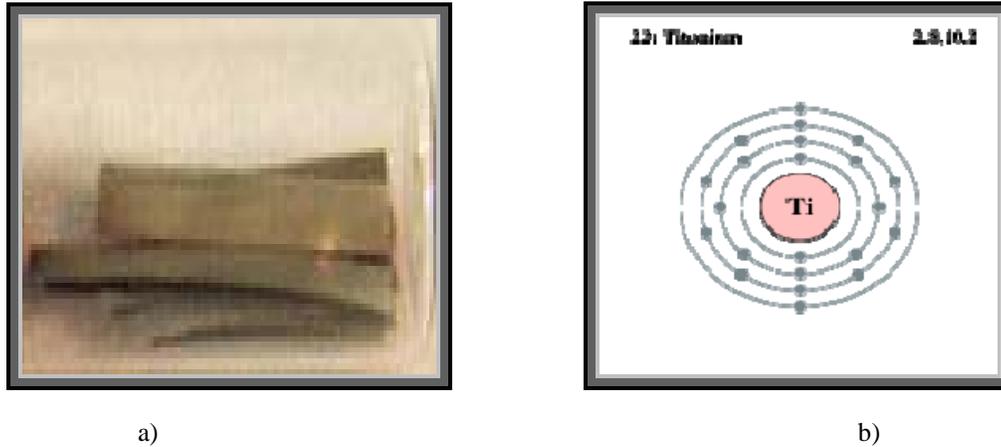


Figura 1.1. Titanio puro, a) físico, b) isotopos.

Electrones del Titanio.

Se encuentran 5 isótopos estables en la naturaleza: ^{46}Ti , ^{47}Ti , ^{48}Ti , ^{49}Ti y ^{50}Ti , siendo el ^{48}Ti el más abundante (73,8%). Se han caracterizado 11 radioisótopos, siendo los más estables el ^{44}Ti , con un periodo de semidesintegración de 60.0 años, ^{45}Ti (184.8 minutos), ^{51}Ti (5.76 minutos) y el ^{52}Ti (1,7 minutos). Para el resto, sus periodos de semidesintegración son de menos de 33 segundos, y la mayoría de menos de medio segundo.

El peso atómico de los isótopos va desde 39,99 uma (^{40}Ti) hasta 57,966 uma (^{58}Ti). El primer modo de decaimiento antes del isótopo más estable, el ^{48}Ti , es la captura electrónica, mientras que después de éste es la desintegración beta. Los isótopos del elemento 21 (escandio) son los principales productos de decaimiento antes del ^{48}Ti , mientras que después son los isótopos del elemento 23 (vanadio).



1.2 Características físicas importante

El Titanio es un metal relativamente ligero que tiene una densidad de 4.54 g/cm^3 , que es intermedio entre el aluminio (2.71 g/cm^3) y el fierro (7.87 g/cm^3)

Entre las características físicas del Titanio se tienen las siguientes:

- Es un metal de transición.
- Tiene un punto de fusión de $1,668^\circ\text{C}$ ($3,024^\circ\text{F}$).
- El peso atómico del Titanio es de 47,867 u.
- Es de color plateado grisáceo.
- Paramagnético. No se imanta.
- Abundante en la naturaleza.
- Reciclable.
- Forma aleaciones con otros elementos para mejorar las propiedades mecánicas.
- Muy resistente a la corrosión y oxidación.
- Refractario.
- Poca conductividad. No es muy buen conductor del calor ni de la electricidad.

El Titanio tiene un punto de fusión elevada de $1,668^\circ\text{C}$, que es más alto que el del hierro ($1,535^\circ\text{C}$), y un módulo de elasticidad de $16.8 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$, que es intermedio entre los valores para el aluminio y el hierro. La densidad, el punto de fusión, y el módulo de elasticidad del Titanio se compara con esas características del aluminio y del hierro en la Tabla 1.2.



Estructura característica del Titanio puro



	Titanio	Aluminio	Hierro
Densidad gm/cm ³	4.54	2.70	7.87
Modulo de elasticidad x 10 ⁶ lb/pulg ²	16.8	9.0	28.5
Punto de fundición °C	1,668	660	1,535
Estructura cristalina en relación a esta temperatura	HCP	FCC	BCC

Tabla 1.2. Selección de las características físicas del Titanio con respecto a las del aluminio y del hierro.

El Titanio existe en dos formas cristalinas alotrópicas. Estas son α que tiene estructura hexagonal compacta (HCP) a temperatura ambiente y hasta 883°C y β , que tiene una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) después de la temperatura de transformación β (883°C).



Estructura característica del Titanio puro

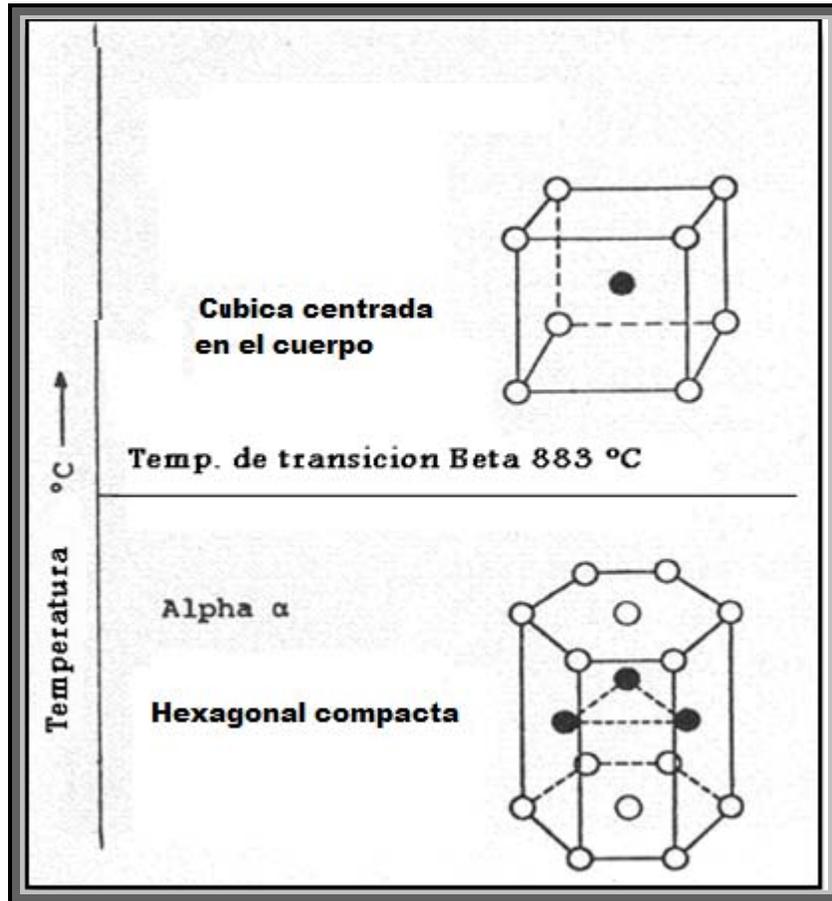


Figura 1.2. Formas cristalinas alotrópicas del Titanio puro.



1.3 Características mecánicas

Entre las características mecánicas del Titanio se tienen las siguientes:

- Mecanizado por arranque de viruta similar al acero inoxidable.
- Permite fresado químico.
- Maleable, permite la producción de láminas muy delgadas.
- Dúctil permite la fabricación de alambre delgado.
- Duro. Escala de Mohs 6.
- Muy resistente a la tracción.
- Gran tenacidad.
- Permite la fabricación de piezas por fundición y moldeo.
- Material soldable.
- Permite varias clases de tratamientos tanto termoquímicos como superficiales.
- Puede mantener una alta memoria de su forma.

La resistencia a la tensión del Titanio puro, es determinada principalmente por los niveles de nitrógeno y oxígeno, y en un menor grado por el contenido del carbón.

La Figura 1.3, muestra los efectos de la adición del oxígeno, nitrógeno y carbón en las propiedades de resistencia a la tensión del Titanio puro. Puesto que el oxígeno es el elemento principal que controla la resistencia del Titanio sin aleantes, el efecto de reforzamiento de los elementos intersticiales oxígeno, nitrógeno y carbón se expresa en términos equivalentes del oxígeno como:

$$\% O_{\text{equiv.}} = \% O + 2.0 (\% N) + 0.67 (\% C)$$



Estructura característica del Titanio puro



Cada equivalente de 0.1% de O₂ de elementos intersticiales en el Titanio puro aumenta la resistencia del Titanio puro en 17.5 ksi.

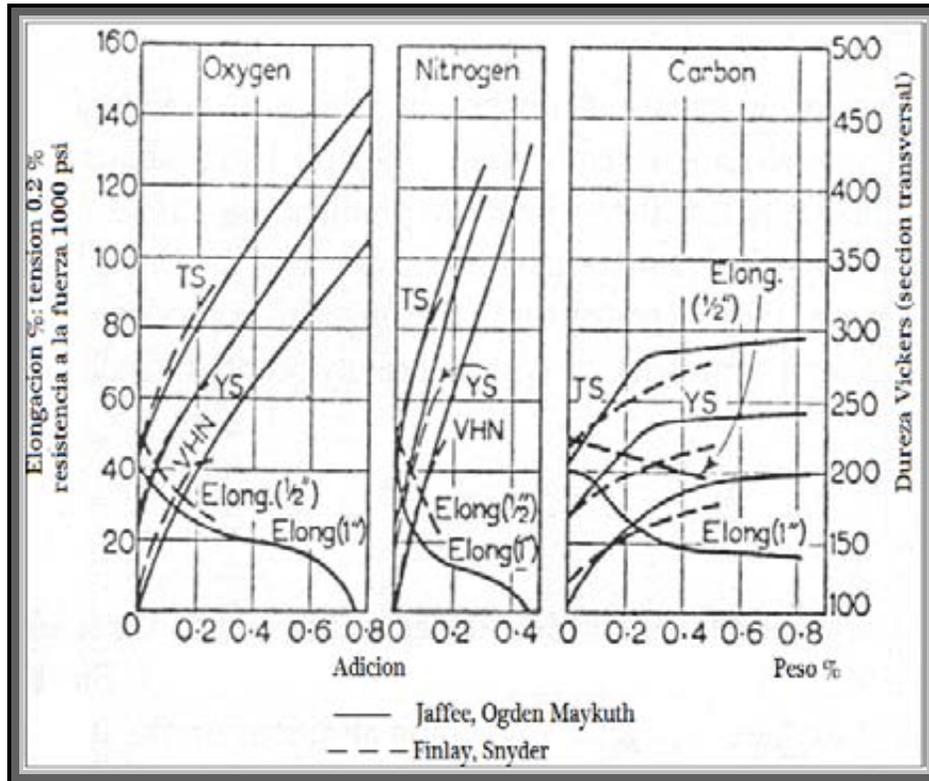


Figura. 1.3. Efecto del oxígeno, y del nitrógeno, y de adiciones del carbón en las características mecánicas del Titanio.



1.4 Características químicas

Las composiciones químicas y los usos de los grados principales de impurezas del Titanio se enumeran en Tabla 1.3.

- Se encuentra en forma de óxido, en la escoria de ciertos minerales y en cenizas de animales y plantas.
- Presenta dimorfismo, a temperatura ambiente tiene estructura hexagonal compacta (HCP) llamada fase alfa. Por encima de 883 °C presenta estructura física centrada en el cuerpo (BCC) se conoce como fase beta.
- La resistencia a la corrosión que presenta es debida al fenómeno de pasivación que sufre (se forma un óxido que lo recubre). Es resistente a temperatura ambiente al ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluido y al ácido clorhídrico (HCl) diluido, así como a otros ácidos orgánicos, también es resistente a las bases, incluso en caliente. Sin embargo se puede disolver en ácidos en caliente. Asimismo, se disuelve bien en ácido fluorhídrico (HF), o con fluoruros en ácidos. A temperaturas elevadas puede reaccionar fácilmente con el nitrógeno, el oxígeno, el hidrógeno, el boro y otros no metales.



Estructura característica del Titanio puro



%Ti	Grado	#ASTM	%C	%Fe	%N	%O	%H	Aplicaciones
99.5	1	B265	0.08	0.20	0.03	0.18	0.015	Partes marinas, intercambiadores de calor, industria aeroespacial etc.
99.2	2	B265	0.08	0.25	0.03	0.20	0.015	Intercambiadores de calor, tuberías, condensadores y evaporadores etc.
99.1	3	B265	0.08	0.25	0.03	0.30	0.015	Industria química, partes que requieren grandes esfuerzos y resistencia a la corrosión etc.
99.0	4	B265	0.08	0.50	0.05	0.40	0.015	Implantes quirúrgicos, compresores, partes con alta resistencia a la corrosión y altos esfuerzos etc.

Tabla 1.3. Composiciones químicas (valores máximos), y principales aplicaciones del Titanio sin impurezas



1.5 Conformado del Titanio

El Titanio puro se puede laminar en frío a temperatura ambiente al 90%, ante dicha reducción en grueso sin agrietamiento serio. Tal deformidad extensa es inusual para los metales de HCP, y es lo más probablemente posible relacionado al cociente bajo de c/a de Titanio.

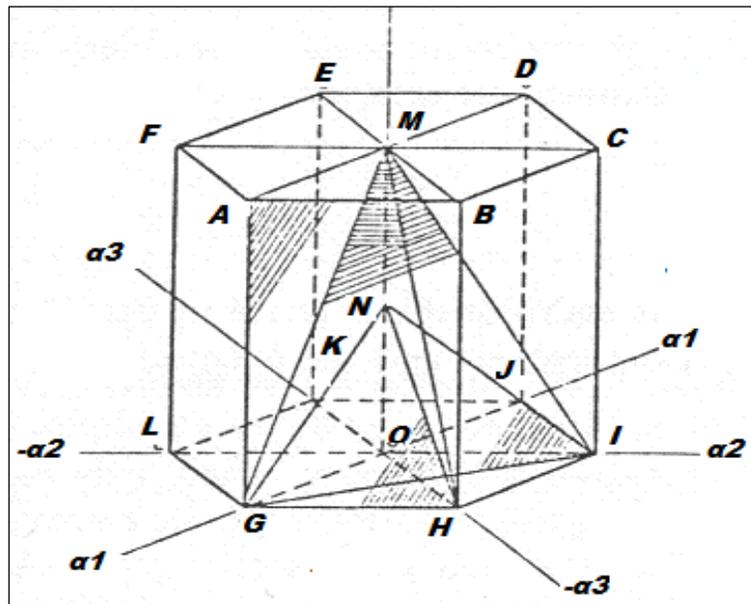
Este cociente para el Titanio está a 1.587, que es -0.046% del ideal de 1.633 (Tabla 1.4). En cambio, el magnesio puro, tiene cociente del c/a 1.624 (-0.9% del ideal), no se puede laminar en frío a más de 50 % incluso en su forma de alta pureza.

Metal	Relación c/a	% desviación desde el ideal	Grupo
Cd	1.886	+0.253	I
Zn	1.856	+0.223	I
Ideal c.p.h.	1.633	0	
Mg	1.624	-0.9	II
Co	1.624	-0.9	II
Zr	1.589	-0.44	III
Ti	1.587	-0.046	III
Be	1.568	-0.065	III

Tabla 1.4. Grupos de los metales importantes de HCP según sus cocientes de c/a .



La ductilidad relativamente alta del Titanio de HCP se atribuye a muchos sistemas de deslizamiento y disponibilidad de maclas en la celda del cristal del Titanio. El Titanio, debido a su cociente bajo de c/a , el deslizamiento ocurre en los planos $\{1010\}$ y $\{1011\}$ planos piramidales así como en los planos básicos (Figura 1.4). La contribución de la familia de planos a la deformación plástica es mucho más importante en el Titanio que en otros metales de HCP tales como magnesio, zinc, y cadmio. Los planos principales, planos de maclas en el Titanio están en $\{1012\}$, $\{1121\}$, y $\{1122\}$ tipos (Figura 1.4).



ABHG prismas planos $\{1010\}$

GHM plano piramidal $\{1011\}$

GHN plano piramidal $\{1012\}$

GIM plano piramidal $\{1121\}$

GIN plano piramidal $\{1122\}$

Dirección del resbalón: OG—eje diagonal, desde $\langle 1120 \rangle$.

Figura 1.4. Enrejado hexagonal que demuestra la posición del resbalón y de hermanamiento de los planos operativos y dirección del resbalón en la deformación plástica del Titanio a temperatura ambiente



Estructura característica del Titanio puro



El tipo de deslizamiento en el Titanio es también el mismo dependiente en la concentración de átomos intersticiales de la impureza tales como oxígeno y nitrógeno. En cristales con el contenido de la impureza de 0.01 % peso, la deformación ocurre en la temperatura ambiente predominante en el plano $\{1010\}$ del prisma, pero un cierto deslizamiento basal también ocurre.

Con el contenido de impureza más arriba (0.1 % peso O_2 y N_2), el deslizamiento ocurre principalmente en el plano piramidal $\{1011\}$.



Estructura característica del Titanio puro



CAPITULO 2

PRODUCCION DEL TITANIO



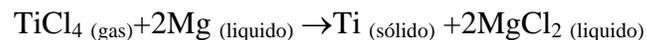
2.1 Extracción del Titanio esponja

El Titanio metálico se obtiene del mineral rutilo, que es dióxido de Titanio aproximadamente de 97 a 98% (TiO_2). El óxido de Titanio del rutilo es convertido químicamente a tetracloruro de Titanio (TiCl_4).

2.2 Proceso Kroll

En 1938 W. J. Kroll descubrió el proceso de producir Titanio esponja mediante la reducción de magnesio del tetracloruro de Titanio. El TiCl_4 reacciona con el magnesio líquido entre 772°C a 872°C en un recipiente cerrado de acero inoxidable. Los productos finales a alta temperatura de esta reacción son el Titanio esponja, cloruro de magnesio (MgCl_2), y un exceso de magnesio.

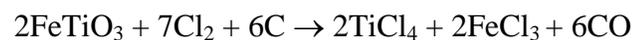
La reacción química es:



El Titanio no se encuentra libre en la naturaleza, los minerales que muestran una mayor concentración de este metal son el rutilo (TiO_2) y la ilmenita ($\text{FeO}\cdot\text{TiO}_2$), además de la anatasa y la brookita (ambas son también TiO_2).

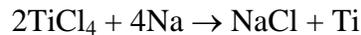
Para obtener Titanio puro a partir de los minerales que lo contienen se utiliza mayoritariamente el llamado Método de Kroll, que consiste en la reducción del compuesto tetracloruro de Titanio con magnesio molido, en una atmósfera de argón para evitar la oxidación. El proceso consta de los siguientes pasos:

- Obtención de tetracloruro de Titanio por cloración a 900°C , en presencia de carbono, mediante la reacción:

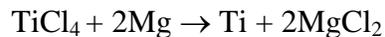




- Purificación del tetracloruro de Titanio mediante destilación fraccionada. Se reduce el TiCl_4 con magnesio o sodio molido en atmósfera inerte, si se utiliza el Sodio (Na) en el proceso se producen la siguiente reacción:



- Si se utiliza el Magnesio (Mg) para purificarlo se produce la siguiente reacción:



- El Titanio forma una esponja en la pared del reactor, la cual se purifica por lixiviación con ácido clorhídrico diluido. El MgCl_2 se recicla electrolíticamente.

En la actualidad (2007) existen varios proyectos de refinado del Titanio, como alternativa al método Kroll, tradicionalmente utilizado desde 1937.

Un poco después los servicios armados de Estados Unidos se interesaron en el metal, principalmente por su alto punto de fusión ($1,668^\circ\text{C}$). Había la posibilidad de desarrollar aleaciones de Titanio a base de níquel y de cobalto. El Titanio tiene una densidad de aproximadamente 0.16 lb/pulg^3 , comparada con la del acero, de 0.28 lb/pulg^3 ; por tanto, las estructuras de aleación del Titanio tienen un alto coeficiente resistencia–peso y son particularmente útiles para piezas de avión. El Titanio tiene excelente resistencia a la corrosión hasta aproximadamente 537°C . Aunque el Titanio es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre, es relativamente costoso obtenerlo de sus minerales.

El Titanio tiene una estrecha afinidad con los gases hidrogeno, nitrógeno y oxígeno, los cuales forman soluciones sólidas intersticiales con el Titanio. Todos tienen un marcado efecto de fortalecimiento, como se ilustra para el nitrógeno en la Figura 1.5.

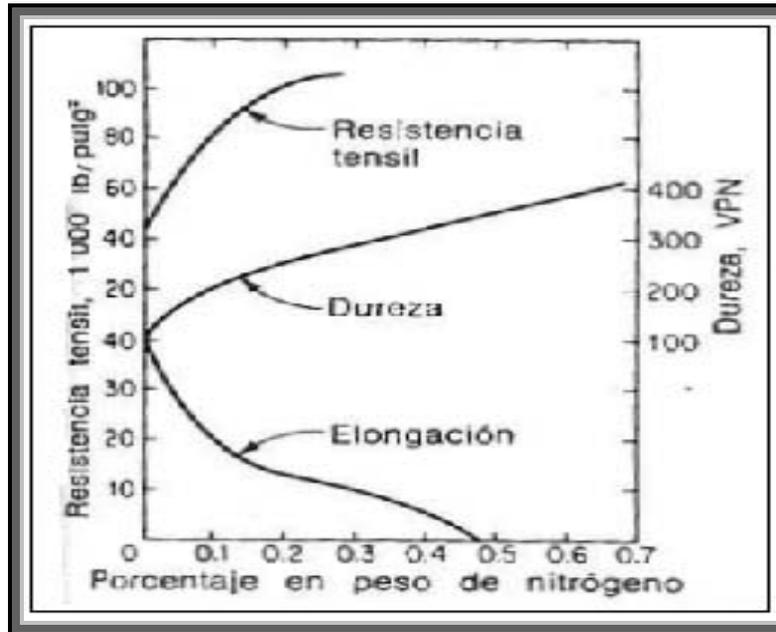


Figura 1.5. Incremento en resistencia debido a la presencia de nitrógeno en lo que de otra forma, sería Titanio puro.

Cuando la cantidad de oxígeno, nitrógeno o hidrógeno absorbidos excede los límites especificados, fragilizan el Titanio, reduciendo la resistencia a cargas aplicadas con impacto y da lugar a fallas por fragilidad bajo cargas constantes a bajos esfuerzos.

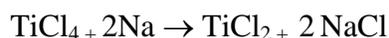
El metal Titanio, tiene una estructura cristalina hexagonal compacta, llamada alfa a temperatura ambiente, estructura que se transforma a beta cúbica centrada en el cuerpo a 883°C (1,625°F).

El Titanio comercialmente puro es menor en resistencia en general, más resistente a la corrosión y menos costoso que las aleaciones de Titanio. Tiene aplicaciones en las que se requiere alta ductilidad para fabricación pero poca resistencia, como tubería para procesos químicos válvulas y tanques, paredes cortafuegos para avión, tubos de escape y cubiertas para compresor.

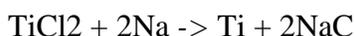


2.3 Proceso Hunter

En el proceso Hunter el TiCl_4 reacciona con sodio en vez de magnesio y la ventaja principal del proceso Hunter es que la reducción del TiCl_4 puede ser realizada en dos pasos. En el primero es que el TiCl_4 es reducido por el sodio a TiCl_2 y NaCl en un reductor continuo (Figura 1.6). La reacción química es



El recipiente de la reacción tiene un mezclador y se mantiene bajo presión positiva con gas argón a una temperatura de 232°C . En el segundo paso del proceso, la fundición que contiene el TiCl_2 y el NaCl , reacciona con sodio adicional en el recipiente que tenga una alta atmósfera de gas del argón (Figura 1.6). Los TiO_2 y el sodio reaccionan en la olla según la reacción.



Esta reacción se realiza a una temperatura por debajo de $1,037^\circ\text{C}$. Una gran cantidad de calor se libera en el primer paso del proceso Hunter, la alta temperatura se puede controlar y mantener durante el segundo paso. Este control permite a los cristales grandes del Titanio ser obtenido, que pueden ser hasta de 150 milímetros en longitud. Finalmente, para el proceso Kroll y Hunter, el Titanio esponja es separado de las sales y del exceso de metal reacciona, por la lixiviación ácida o destilación de vacío.

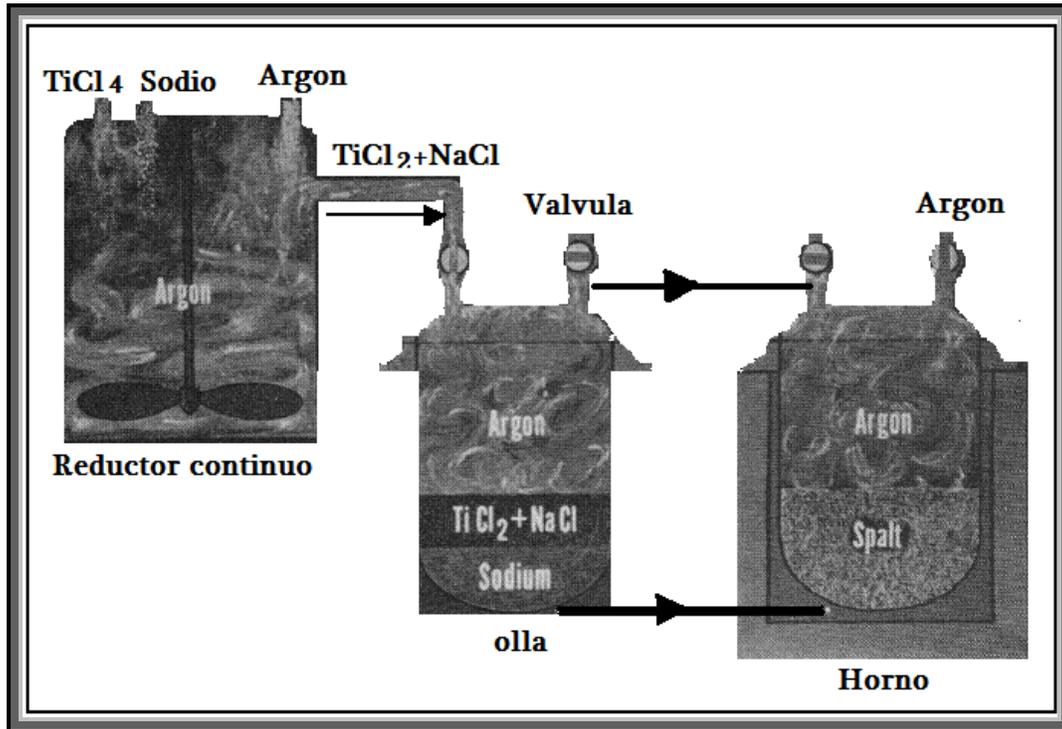


Figura. 1.6. Producción del Titanio esponja de $TiCl_4$ y del Na por el proceso Hunter.

2.4 Preparación de los lingotes de Titanio

Puesto que el Titanio fundido reacciona con oxígeno y nitrógeno en el aire, se debe utilizar un proceso especial para producir los lingotes de Titanio esponja. En la práctica convencional, el Titanio esponja se comprime y se compacta en electrodo que se suelda en vacío para formar electrodos consumibles grandes y posteriormente fundirlo en vacío (Figura 1.7). El vacío en la fundición es necesario puesto que evita que el Titanio fundido reaccione con el oxígeno y el nitrógeno del aire. El electrodo consumible se convierte en el ánodo en el arco eléctrico y el crisol de cobre refrigerado es el cátodo, todo el sistema está en vacío.

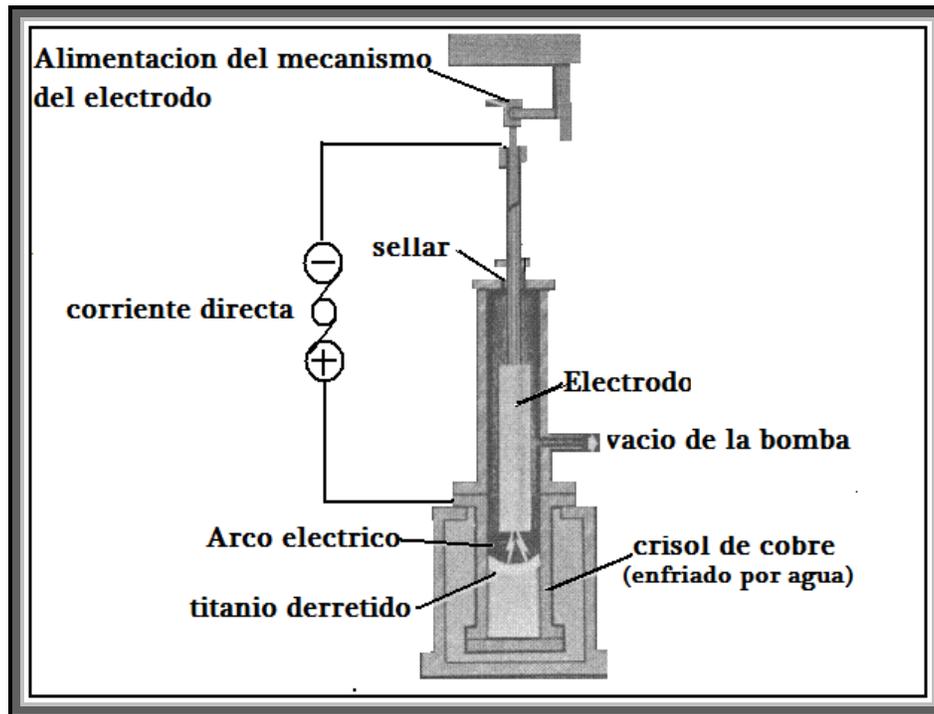


Figura 1.7. Al derretir el arco es vaciado en la instalación para producir los lingotes de Titanio.

Un arco eléctrico es pulsado entre el electrodo comprimido y el crisol de cobre, y el metal fundido recoge y solidifica en el crisol de cobre. Al usar este proceso, pueden ser producidos lingotes de hasta 10 toneladas con diámetros de 36 pulgadas, (Figura 1.8).

Para los lingotes de la aleación, los elementos de aleación se mezclan con el Titanio esponja comprimido antes de fundirlo. El cuidado que debe ser tomado para las adiciones de aleación, es que deben ser distribuidos uniformemente a través del electrodo consumible.

Para la aleación, los lingotes se funden dos veces para asegurar la homogeneidad de los lingotes. En este procedimiento, el lingote que primero se funde sirve como el electrodo para la segunda fundición.



Estructura característica del Titanio puro

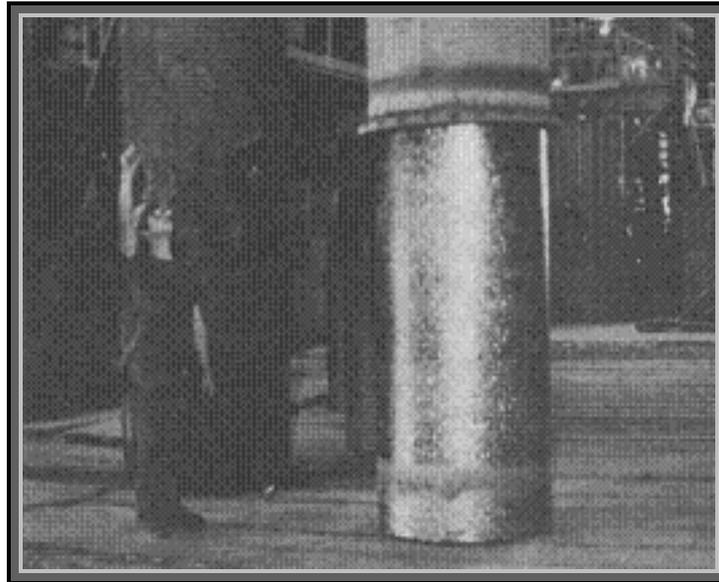


Figura. 1.8. Se remueve el crisol de cobre de un lingote de Titanio homogéneo. Este lingote es de 36” en diámetro y pesa 680 kg.

2.5 Funcionamiento primario

A pesar de la reactividad del Titanio con hidrógeno, oxígeno, y nitrógeno, los procedimientos de trabajo para producir la barra Titanio de alta calidad, placa, hoja, tira, y las extracciones de alambre, tubería y otros productos rolados han sido desarrollados, por lo general, la mayor parte del funcionamiento puede ser hecho con el equipo diseñado para aceros inoxidable u otros aceros especiales. Sin embargo, algunos han sido eliminados por las condiciones de alta temperatura y control de las atmósferas.



2.6 Terminado del lingote

La superficie de lingote fundido de Titanio comercial por arco en vacío, se condicionan primero después de la fundición a que estén libres de defectos superficiales para la forja.

Condicionamiento. Es el proceso de quitar irregularidades e imperfecciones de la superficie del lingote, es hecho generalmente en los molinos. Lo más comúnmente es que los lingotes en caliente sean forjados en una prensa abierta. La presión de la forja, la velocidad de deformación deben ser controladas para evitar agrietar el lingote.

Los lingotes de Titanio aleados primero están precalentados aproximadamente 700 a 760°C para reducir al mínimo los gradientes térmicos indeseables y después se calientan a la temperatura de forja. Los lingotes de Titanio comercialmente puros se forjan entre 980 y 1,040 °C en el proceso de forjado abierto. Si es apreciable el agrietamiento de la superficie durante el forjando, los lingotes pueden acondicionarse con esmerilado y calentar a temperatura de forja.



Estructura característica del Titanio puro



CAPITULO 3

ALEACIONES



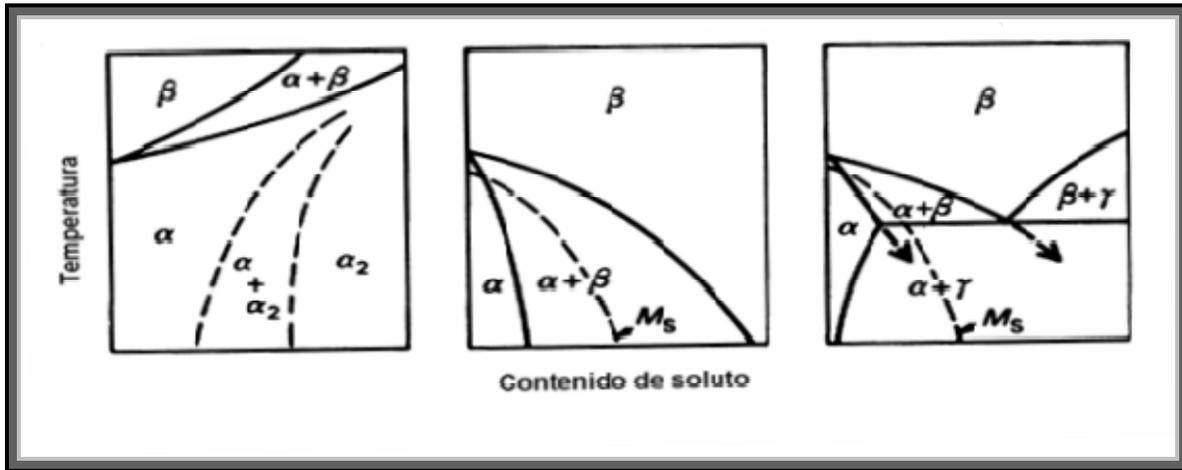
3.1 Aleaciones

Para interpretar las microestructuras que se observan en el Titanio y en sus aleaciones, es necesario tener cierto conocimiento de las diversas aleaciones del Titanio y los sistemas estabilizados, así como los diagramas de fase binarios. Sin embargo, se debe recordar que los diagramas de fase binarios están para las condiciones que se acercan al equilibrio y que la mayoría de las aleaciones comerciales se enfrían a velocidades más rápidas. También, la mayoría de las aleaciones de Titanio son de los tipos ternarios o cuaternarios y no son aleaciones binarias.

Los elementos con menos de cuatro electrones de valencia por átomo, son elementos alfégenos, es decir, elevan la temperatura de transformación alotrópica $\alpha \rightarrow \alpha + \beta$, estabilizando la fase α y ampliando su intervalo de existencia. Estos elementos presentan diagramas de equilibrio como el que se indica esquemáticamente en la Figura 1.9 a. A este grupo pertenecen al aluminio y el galio, y el mismo tipo de diagrama lo presentan elementos intersticiales como el oxígeno, carbono, boro o nitrógeno.

Por otra parte, los elementos de más de cuatro electrones de valencia por átomo, son β -estabilizantes o betágenos, o sea, se disuelven preferentemente en la fase β . Estos elementos disminuyen la temperatura de transición $\beta \rightarrow \alpha + \beta$, conocida como temperatura β -transus, y pueden dividirse en dos grupos: los llamados β -isomorfos que forman diagramas del tipo que se muestra en la figura 1.9 b (molibdeno, wolframio, vanadio, niobio y tántalo), y los que favorecen la formación de sistemas β -eutectoides como se muestra en la figura 1.9 c, en la que la fase β se transforma en la fase α y en otra fase intermedia rica en elemento de aleación; elementos de este tipo son: cobre, manganeso, cromo, hierro, níquel, cobalto, plata, oro y el hidrógeno como elemento intersticial.

Otros elementos como el circonio, el estaño y el silicio se consideran neutros, ya que estabilizan las dos fases y se disuelven en ambas. En la figura 1.9 se muestra el diferente efecto provocado por los elementos de aleación.



(a)

(b)

(c)

Figura 1.9. Diagramas de equilibrio típicos para las aleaciones de Titanio; (a) elementos α estabilizantes, (b) elementos β estabilizantes, (c) elementos β eutectoides.

Según la capacidad de los aleantes de estabilizar la fase α o β , se definen tres tipos de aleaciones de Titanio: las aleaciones tipo α , aleaciones tipo α/β y aleaciones β . Las aleaciones tipo α/β se suelen clasificar a su vez en casi α , cuando tiene una estructura esencialmente α a temperatura ambiente, y casi β , cuando la estructura a temperatura ambiente es mayoritariamente β .

La clasificación anterior se justifica por el diferente comportamiento mecánico de ambas fases.

La fase α presenta poca ductilidad, pero un buen comportamiento a la fluencia, mientras que la fase β tiene una buena resistencia en frío y buena conformabilidad. La adición de diferentes elementos aleantes y la realización de procesos termoquímicos permiten obtener un amplio rango de aleaciones de Titanio con diferentes propiedades. En la Tabla 1.5 se muestra la influencia de los diferentes elementos de aleación en las propiedades del material.



Estructura característica del Titanio puro



Elementos α -estabilizantes	Elementos neutros	Elementos β -estabilizantes		
		β -isomorfos	β -eutectoides	
Aluminio Galio Oxígeno Carbono Nitrógeno	Circonio Estaño Silicio	Molibdeno Volframio Vanadio Tántalo Niobio	Cobre Manganeso Cromo Hierro Cobalto Níquel Hidrógeno	
Tipo de aleación				
α	casi α	$\alpha + \beta$	casi β	β
<p>Densidad \longrightarrow</p> <p>Respuesta al tratamiento térmico \longrightarrow</p> <p>Resistencia a la tracción \longrightarrow</p> <p>Conformabilidad \longrightarrow</p> <p>\longleftarrow Comportamiento a fluencia</p> <p>\longleftarrow Resistencia a la corrosión</p> <p>\longleftarrow Soldabilidad</p>				

Tabla 1.5. Influencia de los diferentes elementos de aleación en las propiedades del material

El aluminio es un estabilizador alfa, como puede verse en el diagrama de fase Ti-Al, Figura 1.10.



Estructura característica del Titanio puro

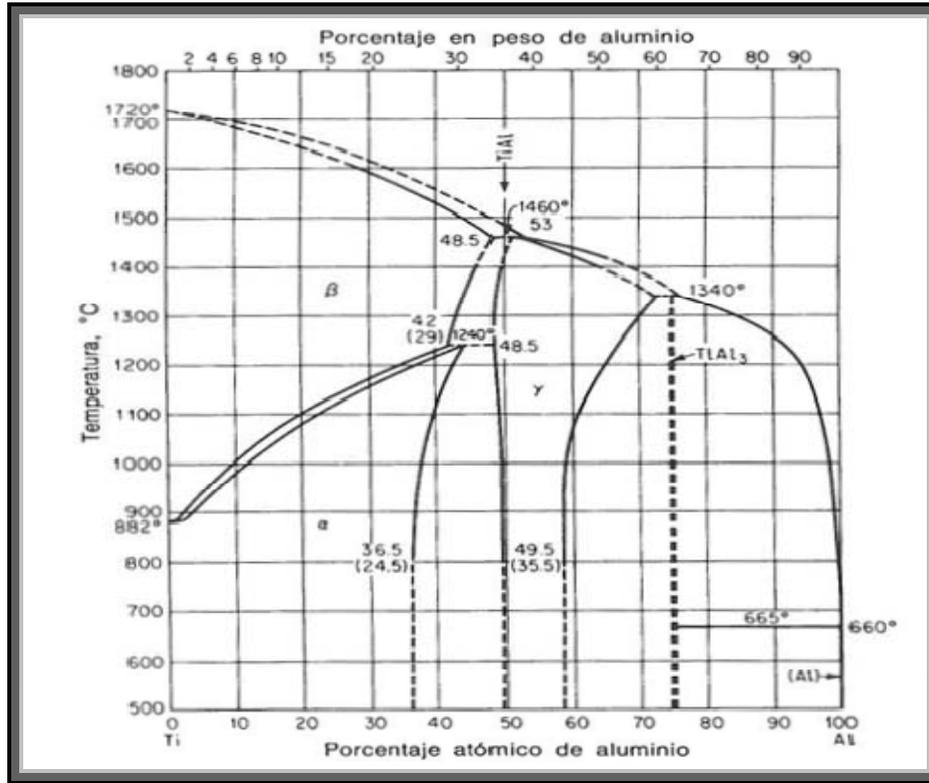


Figura 1.10. Diagrama de fase Ti-Al.

El cromo, el molibdeno, el vanadio, el manganeso y el hierro son importantes estabilizadores beta. Los sistemas de aleación Ti-Mo y Ti-V Figura 1.11 muestran compleja solubilidad solida, formando la solución solida beta sobre todo intervalo.

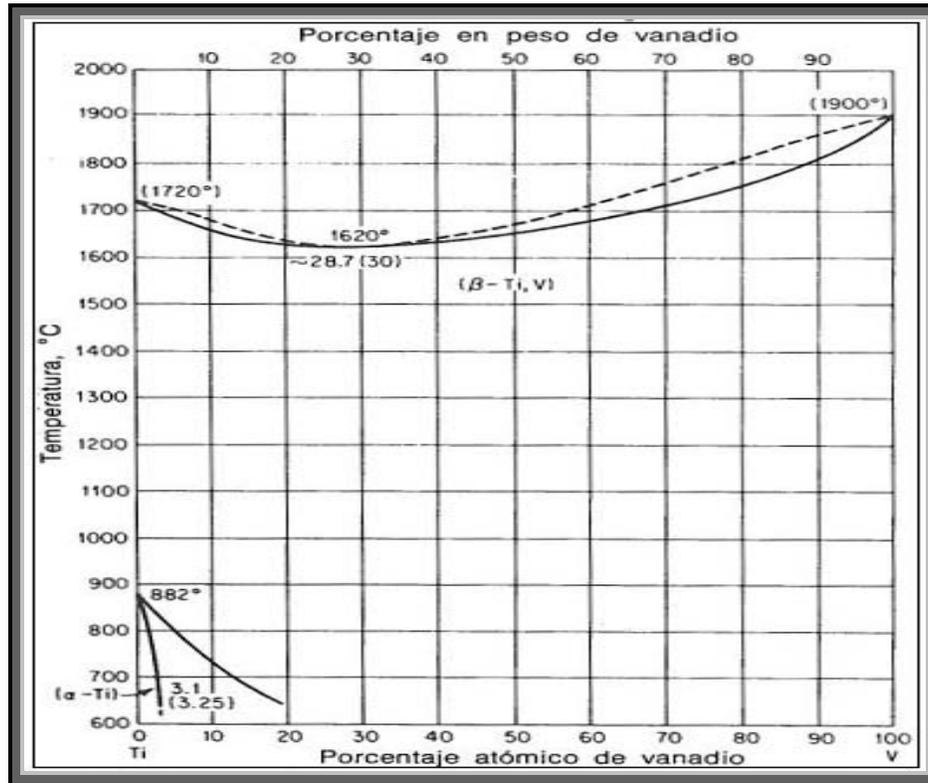


Figura 1.11. Diagrama de fase Ti-V.

El campo de fase alfa es severamente restringido con su máxima extensión de 1.8% de Mo y 3.5% de V. El diagrama de fase Ti-Mn mostrado en le Figura 1.12 ilustra un estabilizador beta por medio de una reacción eutectoide. En los sistemas eutectoides siempre ocurren los compuestos intermetalicos, el estaño es sustancialmente neutral en la cantidad presente en aleaciones comerciales. Las relativas cantidades de estabilizadores alfa y beta en una aleación, además del tratamiento térmico, determinan si su microestructura es predominantemente alfa unifasica una mezcla de alfa y beta, o la fase única beta sobre el intermedio útil de temperatura.

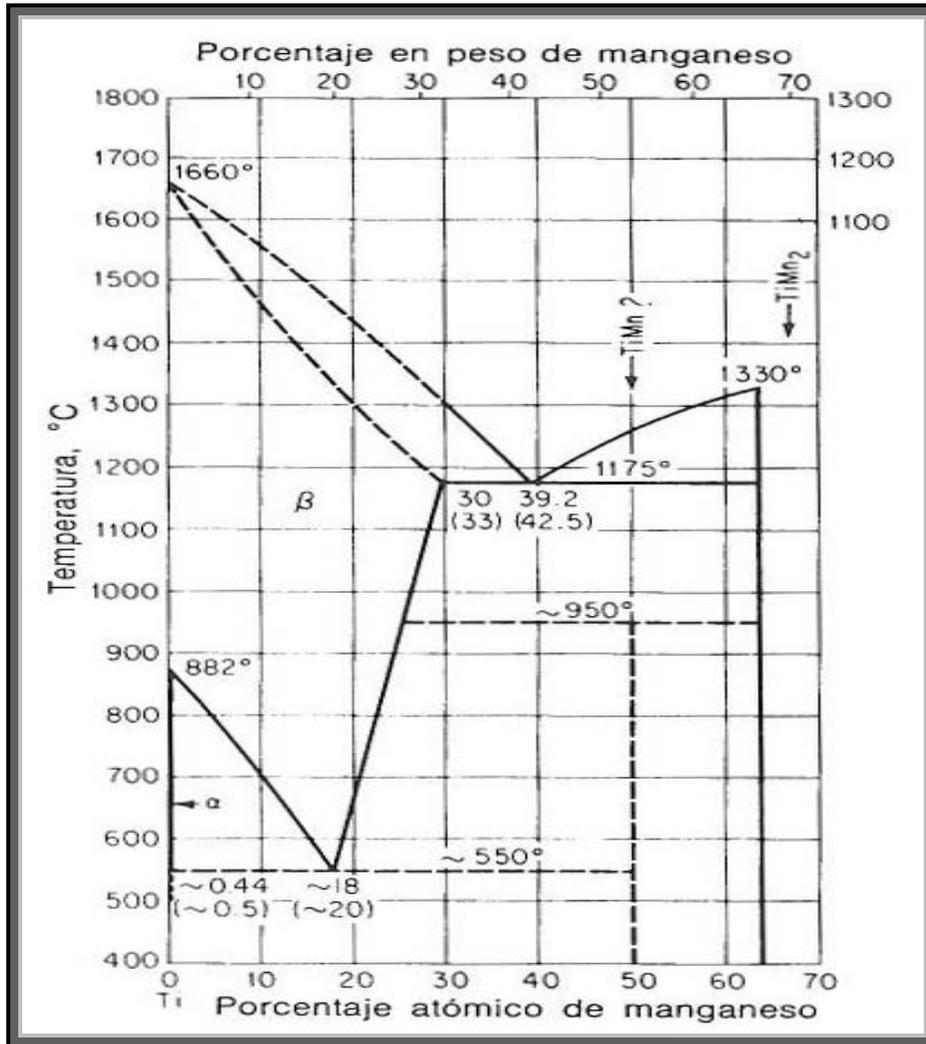


Figura 1.12. Diagrama de fase Ti-Mn.

Las propiedades están relacionadas directamente con la microestructura. Las aleaciones de la fase única son soldables con buena ductilidad; algunas de las dos fases son soldables también, pero sus partes soldadas resultan menos dúctiles. Las aleaciones bifásicas alfa-beta son más fuertes que las unifásicas alfa, principalmente por la beta BCC es más fuerte que la alfa CPH. Lo más importante es que las aleaciones bifásicas pueden fortalecerse mediante tratamiento térmico, porque las microestructuras pueden manipularse si se controla el calentamiento, el templeado y los ciclos de envejecimiento.



3.2 Aleaciones de Titanio alfa (α)

Las aleaciones usuales totalmente alfa contienen 5% de Al y 2,5% de Sn, ambos endurecedores de alfa por solución. Estas aleaciones tienen adecuada resistencia a la corrosión y a la oxidación, mantienen bien su resistencia a elevadas temperaturas, tienen conveniente soldabilidad y normalmente poseen aceptable ductibilidad y conformabilidad a pesar de su estructura HC. Las aleaciones alfa se recuecen a temperaturas elevadas en la región beta y luego se enfrían. El enfriamiento rápido proporciona una estructura alfa de grano acircular fino, en tanto que un enfriamiento en horno proporciona una estructura de placas.

La mayoría de las aleaciones alfa contienen unos elementos de aleación y de estabilización beta.

Las composiciones de estas aleaciones están balanceadas por el alto contenido de aluminio, de manera que las aleaciones son esencialmente alfa unifasicas. La Figura 1.13 muestra la gruesa placa tipo alfa en una aleación Ti-5Al-2.5Sn, después de trabajarse en caliente y recocerse. Las aleaciones alfa tienen dos atributos principales; la capacidad de soldado y la capacidad de resistencia a altas temperaturas.



Figura 1.13. Aleación Ti-5Al-2.5Sn trabajada en caliente por debajo de la temperatura de transformación α , recocida durante 30 min. A $1,177^{\circ}\text{C}$ superior a la temperatura de transformación β , y enfriada en horno. La estructura α es gruesa tipo placa. Atacada químicamente en reactivo de Kroll, 100x.

La primera resulta de la microestructura unifásica, en tanto que la segunda es causada por la presencia del aluminio. Los elementos de aleación en solución fortalecen las aleaciones de fase alfa y el aluminio es el fortalecedor más efectivo de las aleaciones alfa. Muy importante es que su efecto perdura a altas temperaturas. El trabajo en caliente de las aleaciones alfa con más del 6% de aluminio es difícil. La capacidad de trabajo en caliente de las aleaciones alfa con alto contenido de aluminio mejora cuando se agregan elementos de aleación y estabilizadores beta, en cantidades suficientemente pequeñas, de manera que la fase beta está presente en pequeñas cantidades en la microestructura recocida.

Entre algunas de las aplicaciones de la aleación Ti-5Al-2.5Sn se incluyen ensambles de tubos de escape para avión y otros componentes formados de lamina que operan a temperaturas hasta 482°C y tanques para combustible de proyectiles y partes estructurales que operan por cortos periodos a temperaturas hasta 593°C .



3.3 Aleaciones de Titanio beta (β).

Aunque las adiciones excesivas de vanadio o molibdeno producen una estructura totalmente beta a temperatura ambiente, ninguna de las llamadas aleaciones beta están realmente aleadas a tal grado. En lugar de esto, abundan en estabilizadores de beta, de modo que el enfriamiento rápido produce una estructura metaestable compuesta en su totalidad de beta. En la condición recocida, donde sólo existe beta en la microestructura, la resistencia proviene del endurecimiento por solución sólida. Las aleaciones también pueden ser envejecidas para producir resistencias mayores. Sus aplicaciones incluyen los sujetadores de alta resistencia, vigas y otros elementos para su uso aeroespacial.

De manera diferente de las aleaciones alfa, las aleaciones beta pueden reforzarse mediante tratamiento térmico. La Figura 1.14 muestra la microestructura de solo beta en una aleación Ti-3Al-13V-11Cr después del tratamiento de solución por 10 min. a 787°C; esta aleación es soldable en las condiciones de recocido y de tratado térmico. El envejecimiento a elevada temperatura después del tratamiento de la solución precipita finas partículas de alfa y compuesto TiCr₂. La microestructura después del envejecimiento por 48hr. a 482°C muestra oscuras partículas de alfa precipitada en granos beta (Figura 1.14 b). Las resistencias límite hasta de 215,000 lb/pulg² con 5% de elongación son posibles después del tratamiento térmico. Este es un incremento sobre la resistencia después del recocido de por lo menos 50%. Las aleaciones beta se han utilizado para sujetadores de alta resistencia y para componentes aeroespaciales que requieren alta resistencia a temperaturas moderadas.



Estructura característica del Titanio puro

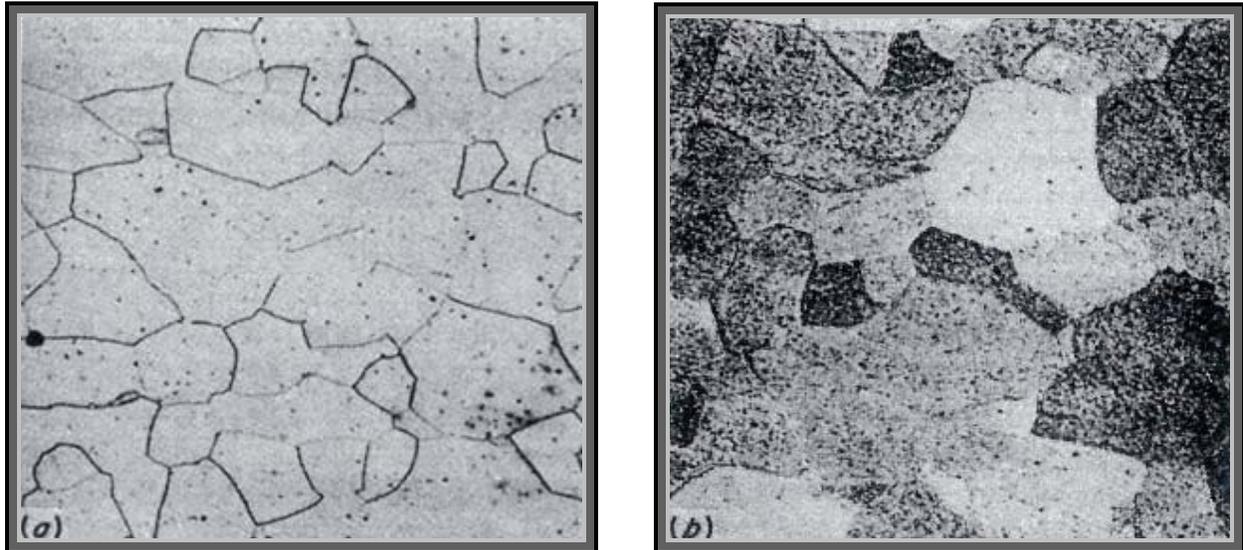


Figura 1.14. Lamina de Ti-13V-11Cr-3Al. a) Con tratamiento térmico de solución por 1° min. a 787°C, y enfriada en aire. La estructura consta de granos de ejes iguales de beta metaestable. b) Lo mismo que en a) excepto que fue envejecida durante 48 hr. a 482°C. La estructura consta de oscuras partículas de α precipitados en granos β . Atacado químicamente en 2HF, 10HNO₃, 88H₂O, 250.



Estructura característica del Titanio puro



En la Tabla 1.6 aparecen las propiedades mecánicas típicas de algunas aleaciones de Titanio.

Aleación	Condición	Temperatura ambiente		
		Resistencia tensil, lb/pulg ²	Resistencia a la cedencia, lb/pulg ²	Porcentaje de Elongación
Titanio comercialmente puro				
Pureza comercial	Recocido	79 000	63 000	27
Aleaciones alfa al Titanio				
Ti-5Al-2.5Sn	Recocido	125 000	120 000	18
Ti-6Al-4Zr-1V	Recocido	143 000	138 000	17
Ti8Al-1Mo-1v	HT+	147 000	135 000	16
Aleaciones Alfa-Beta al Titanio				
Ti-8Mn	Recocido	138 000	135 000	15
Ti-4Al-4Mn	Recocido	148 000	133 000	16
	HT+	162 000	140 000	9
Ti-6Al-4V	Recocido	135 000	120 000	11
	HT+	170 000	150 000	7
Ti-7Al-4Mo	Recocido	160 000	150 000	15
	HT+	190 000	175 000	12
Aleaciones Beta al Titanio				
TI-3Al-13V-11Cr	HT+	180 000	170 000	6

Tabla 1.6. Propiedades mecánicas típicas de algunas aleaciones de Titanio



3.4 Aleaciones de Titanio alfa-beta (α - β)

Las aleaciones alfa-beta pueden tratarse térmicamente para obtener altas resistencias. La aleación es tratada por solución cerca de la temperatura beta-transus (o de transición de la fase beta), lo que permite la persistencia de una pequeña cantidad de alfa para evitar el crecimiento de grano. Después, la aleación es enfriada rápidamente para formar una solución sólida sobresaturada metaestable beta' o martensita de Titanio alfa'. Luego la aleación es envejecida o revenida alrededor de 500°C.

Durante el envejecimiento las fases alfa y beta finalmente dispersas y el precipitado de la fase beta' o alfa', incrementa la resistencia de la aleación.

Normalmente, la martensita de Titanio se forma en las aleaciones alfa-beta con menos porcentaje de elementos aleantes, mientras que la beta sobresaturada es retenida más fácilmente en las aleaciones más cercanas a las aleaciones enteramente de fase beta. La martensita de Titanio tiene típicamente una apariencia acicular.

Durante el envejecimiento, la fase alfa se precipita en una estructura Widmanstätten que mejora las propiedades a la tensión así como la tenacidad de la aleación. Las componentes para estructuras aeroespaciales, motores a reacción y trenes de aterrizajes son aplicaciones típicas de las aleaciones alfa-beta tratadas térmicamente. La aleación Ti-6% Al-4% V es la soldadura simultánea por difusión, se pueden fabricar elementos complicados.

Estas aleaciones contienen suficientes elementos de estabilización beta para provocar que la fase beta persista hasta la temperatura ambiente y son más fuertes que las aleaciones alfa. La fase beta, fortalecida por las adiciones de aleación beta en solución, es más fuerte que la alfa. Si esta última en las aleaciones alfa-beta es fortalecida por aluminio, la aleación alfa-beta será todavía más fuerte, especialmente a altas temperaturas. La Figura 1.15 muestra la microestructura alfa-beta en una aleación recocida Ti-Mn.



Las aleaciones alfa-beta pueden fortalecerse posteriormente por medio de tratamiento térmico.

Esencialmente esto se lleva a cabo templando desde una temperatura en el campo alfa-beta seguida por un envejecimiento a temperatura moderadamente elevada.

En contraste con el procedimiento usual de endurecimiento por envejecido, en la primera etapa no se forma una solución sólida homogénea beta. Si se formara una estructura de solo beta, el tamaño de grano beta sería demasiado grande, y la formación subsecuente de alfa sería principalmente en los límites de grano beta. Estos factores reducen la ductilidad de la aleación envejecida. El templado detiene la transformación de la fase beta existente a alta temperatura, que ocurrirá con un enfriamiento lento. El envejecimiento a elevada temperatura da lugar a la precipitación de finas partículas de alfa en los volúmenes que fueron granos beta antes de templar. Esta estructura fina es más fuerte que la gruesa estructura recocida alfa-beta.



Figura 1.15. Aleación Ti-8Mn, recocida por 2 hr. a 700°C, enfriada en horno a 600°C y mantenida a esa temperatura por 1hr, presenta granos α (grises) en una matriz β (clara), también α en las anteriores fronteras de grano β . Atacada químicamente en reactivo de Kroll, 500x.



En algunos casos, las estructuras templadas de aleación al Titanio pueden ser de una forma inestable de alfa, designada alfa prima y llamadas martensita de Titanio. Esta designación se tomo originalmente de la Metalurgia del acero, en la que la martensita es una estructura metaestable formada por una transformación de fase sin difusión cuando el acero se temple desde una alta temperatura; sin embargo en la terminología moderna, la martensita es una palabra para designar cualquier estructura metálica tipo aguja formada por un cambio sin difusión, generalmente de enfriamiento rápido.

La Figura 1.16, muestra la estructura de la martensita de Titanio en una aleación Ti-6Al-4V se emplean en discos y aletas de hélice de compresor de turbina de gas para avión; accesorios forjados para estructuras de avión, y piezas de laminas metálicas para estructura de avión.

La aleación Ti-8Mn se utiliza para forros y piezas estructurales primarias de avión sujetas a temperaturas en el intervalo de 93 a 315°C.

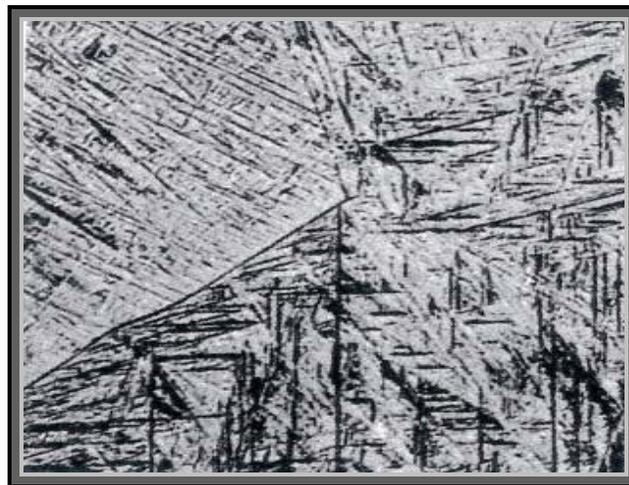


Figura 1.16. Aleación Ti-6Al-4V, mantenida durante 1 hr. a 1,065°C, la cual es superior a la temperatura de transformación de β y templada en agua. La estructura es α' (martensita del Titanio) antes de β las fronteras de grano también son visibles. Atacada químicamente en 10 HF, 5HNO₃, 250x.



Estructura característica del Titanio puro



CAPITULO 4

APLICACIONES DEL TITANIO



4.1 Biomédicas

El Titanio es un metal biocompatible, porque los tejidos del organismo toleran su presencia sin que se hayan observado reacciones alérgicas del sistema inmunitario. Esta propiedad de biocompatibilidad del Titanio unido a sus cualidades mecánicas de dureza, ligereza y resistencia han hecho posible una gran cantidad de aplicaciones de gran utilidad para aplicaciones médicas, como prótesis de cadera y rodilla, tornillos óseos (Figura 1.17), placas antitrauma e implantes dentales, componentes para la fabricación de válvulas cardíacas y marcapasos, gafas, herramental quirúrgico tales como bisturís, tijeras, etc., y también la gran cantidad de piezas llamadas piercing (que se incrustan por zonas del cuerpo especialmente los adolescentes).



Figura 1.17. Prótesis ósea.

- La aleación de Titanio más empleada en este campo contiene aluminio y vanadio según la composición: Ti_6Al_4V . El aluminio incrementa la temperatura de la transformación entre las fases alfa y beta. El vanadio disminuye esa temperatura. La aleación puede ser bien soldada. Tiene alta tenacidad.



Las especificaciones de ASTM para el titanio quirúrgico son las siguientes:

- ASTM B265: placa y lámina: ASTM F1108 Ti₆Al₄V: pieza moldeada para implantes quirúrgicos
- ASTM B299: esponja: ASTM F1295 Ti₆Al₇: aleaciones de Titanio para aplicaciones de implantes quirúrgicos
- ASTM B861/B862: tubo: ASTM F1341: alambre de Titanio sin aleaciones para aplicaciones de implante quirúrgico
- ASTM B338: ASTM F136 Ti₆Al₄V: eli para aplicaciones de implante quirúrgico
- ASTM B348: barra: ASTM F1472 Ti₆Al₄V: para aplicaciones de implante quirúrgico
- ASTM B363: conexiones: ASTM F620 Ti₆Al₄V: eli forjados para implantes quirúrgicos
- ASTM B367: piezas moldeadas: ASTM F67: Titanio sin aleaciones para aplicaciones de implante quirúrgico.
- ASTM B381: forjado: varias especificaciones especiales AMS y MIL-T.

Las razones para considerar el material ideal para implantes endoóseos son:

- El Titanio es inerte, la cubierta de óxido en contacto con los tejidos es insoluble, por lo cual no se liberan iones que pudieran reaccionar con las moléculas orgánicas.
- El Titanio en los tejidos vivos representa una superficie sobre la que el hueso crece y se adhiere al metal, formando un anclaje anquilótico, también llamado osteointegración.

Esta reacción normalmente sólo se presenta en los materiales llamados bioactivos y es la mejor base para los implantes dentales funcionales.

- Posee buenas propiedades mecánicas, su fuerza de tensión es muy semejante a la del acero inoxidable utilizado en las prótesis quirúrgicas que reciben carga. Es mucho más fuerte que la dentina o cualquier cortical ósea, permitiendo a los implantes soportar cargas pesadas.



- Este metal es suave y maleable lo cual ayuda a absorber el choque de carga.
- Debido a la biocompatibilidad del Titanio no se han descubierto casos de toxicidad tanto en el Titanio elemental como en el dióxido de Titanio
- Se han detectado algunos efectos de la sobreexposición al polvo de Titanio por lo que la inhalación del polvo puede causar tirantez y dolor en el pecho, tos, y dificultad para respirar. El contacto con la piel y los ojos puede provocar irritación. Vías de entrada: Inhalación, contacto con la piel, contacto con los ojos.
- Respecto a la cancerología que pueda tener, la agencia internacional para la investigación del cáncer (IARC) ha incluido el dióxido de titanio en el grupo 3 que consiste en que el Titanio nos es clasificable como elemento cancerígeno en los humanos (*el agente no es clasificable con respecto a su carcinogenicidad en humanos*).

4.2 Industria energética

El titanio es muy utilizado en la construcción de sistemas de intercambio térmico en las centrales térmicas eléctricas (y también en las centrales nucleares), debido principalmente a sus características de resistencia mecánica (lo que hace que los haces tubulares que constituyen esos intercambiadores sean muy resistentes a las vibraciones y que los espesores de los tubos puedan ser menores, facilitando el intercambio de calor) y químicas (el titanio, a semejanza del cobre, genera una capa inoxidable sobre su superficie, lo que lo hace mucho más resistente a la corrosión).



Figura 1.18. Industria energética (tanques de almacenamiento).

4.3 Industria de procesos químicos

Determinadas aleaciones de Titanio se utilizan para fabricar componentes de las industrias de proceso tales como bombas, depósitos, reactores químicos y columnas de fraccionamiento en centrales que utilizan agua de mar como refrigerante. También se emplea en las unidades de desulfuración de gases que permiten reducir las emisiones de dióxido de azufre de las centrales térmicas de carbón. Estas aplicaciones son posibles gracias a la gran resistencia del Titanio ante los agentes corrosivos tales como el agua salada, las soluciones de clorito e hipoclorito, el ácido nítrico, los ácidos crómicos, los cloruros metálicos, los sulfuros o los ácidos orgánicos.



Figura 1.19. Torres de destilación.

4.4 Industria automotriz

Un sector nuevo se ha incorporado a la fabricación de componentes de Titanio, donde las empresas automovilísticas están incorporando componentes de Titanio en los vehículos que fabrican, con el fin de aligerar el peso de los mismos, así por ejemplo ya existen muelles y bielas de Titanio. Especialmente en el caso de los muelles se mejora el módulo de Young y una mejor calidad de la suspensión.



Estructura característica del Titanio puro



Figura 1.20. Industria automotriz.

4.5 Industria militar

El Titanio se emplea en la industria militar como material de blindaje, en la construcción de los portaaviones, en la carrocería de vehículos ligeros, en la construcción de submarinos nucleares y en la fabricación de misiles.



Figura 1.21. Industria militar.



4.6 Industria aeronáutica y espacial

Debido a su fuerza, baja densidad y el que puede soportar temperaturas relativamente altas, las aleaciones de Titanio se emplean en aviones y cohetes espaciales. El Titanio y sus aleaciones se aplican en la construcción aeronáutica básicamente para construir forjados estructurales de los aviones, discos de ventilación, álabes, y palas de turbinas.



Figura 1.22. Motor de Airbus A-380 con 11 Tm de Titanio

4.7 Construcción naval

La propiedad que tiene el Titanio de ser resistente a la corrosión permite que algunas de sus aleaciones sean muy utilizadas en construcción naval donde se fabrican hélices y ejes de timón, cascos de cámaras de presión submarina, componentes de botes salvavidas y plataformas petrolíferas, así como intercambiadores de calor, condensadores y conducciones en centrales que utilizan agua de mar como refrigerante, porque el contacto con el agua salada no le afecta.



Estructura característica del Titanio puro



Figura 1.23. Submarino nuclear

4.8 Industria relojera

Los relojes deportivos que requieren un material resistente a menudo usan el Titanio, un metal fuerte, blanco. Los relojes de pulsera de titanio son de peso ligero, 30% más fuertes que los de acero y resisten la corrosión. Generalmente tienen una capa protectora para hacerlos resistentes a los rayones. Se fabrican las cajas de Titanio e incluso las correas de sujeción.



Figura 1.24. Reloj fabricado con carcasa de Titanio.



4.9 Joyería y bisutería

Cada vez se está utilizando más el Titanio como metal seminoble en el ámbito de la joyería y de la bisutería. Así es posible encontrar pulseras, pendientes, anillos, etc., fabricados en este metal. Para mejorar el aspecto superficial del Titanio se le somete a diferentes tipos de procesos que refuerzan su belleza.



Figura 1.25. Joyería

4.10 Industria deportiva

Con Titanio se producen actualmente distintos productos de consumo deportivo como palos de golf, bicicletas, cañas de pescar, etc.



Figura 1.26. Deportes.

4.11 Decoración

También se han empleado láminas delgadas de Titanio para recubrir algunos edificios, como por ejemplo el Museo Guggenheim Bilbao.

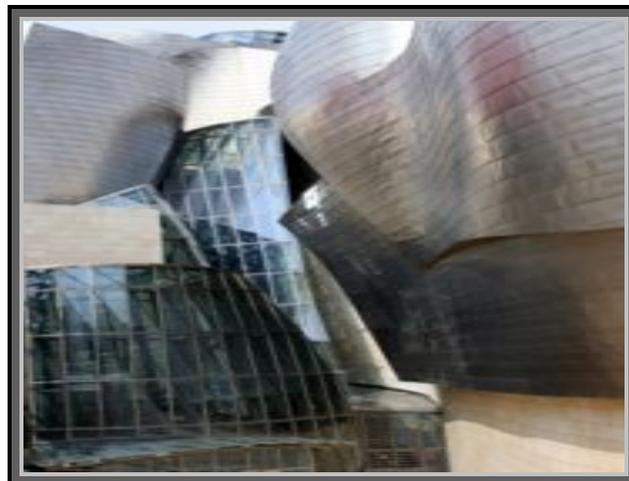


Figura 1.27. Museo Guggenheim de Bilbao cubierto de láminas de Titanio



Estructura característica del Titanio puro



CAPITULO 5

METALURGIA DEL TITANIO



5.1 Procesos tecnológicos.

5.1.1 Fundición

La fundición de piezas de Titanio se realiza cuando se trata de piezas de diseño complejo que hace difícil el forjado o mecanizado de las mismas. Hay muchas aplicaciones donde se utilizan piezas fundidas desde piezas muy voluminosas hasta piezas muy pequeñas de aplicaciones biomédicas.

Hay dos métodos principales para la fundición de piezas:

- Fundición por moldeo de grafito apisonado, recomendado para la fundición de piezas de gran tamaño por ser el procedimiento más económico porque no hay necesidad de fabricar moldes especiales.
- Fundición a la cera perdida, es el método más apropiado para fundir piezas pequeñas y de gran precisión con acabados de alta calidad.

En el desarrollo de las diferentes prótesis óseas y dentales se recurre a la fundición de los componentes en hornos muy sofisticados para obtener una gran precisión y calidad de las piezas fundidas, a partir de los moldes adecuados. Debido a la afinidad del Titanio líquido por el oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, así como la reactividad con los crisoles y moldes metálicos, se requiere que la fusión sea al vacío y en crisoles de grafito.

Las propiedades mecánicas de las piezas de fundición son muy similares a las de las piezas forjadas y del titanio en general. Se funden piezas de hasta 600 Kg, tanto de Titanio comercial puro como de las diferentes aleaciones.

La verificación de piezas fundidas se realiza mediante líquidos penetrantes, rayos X o ultrasonidos.



5.1.2 Forja

Para la conformación de piezas de Titanio por forjado se pueden utilizar las técnicas y herramientas convencionales que se utilizan para el forjado de piezas de acero. El forjado en caliente exige controlar rigurosamente la temperatura con la que se trabaja, para obtener un control exacto de la estructura de la pieza y de sus propiedades.

Se pueden forjar piezas de cualquier aleación de Titanio con estructura de grado único y con una resistencia y dureza direccionales o localizadas. Las modernas máquinas herramientas de mecanizado por Control Numérico están eliminando muchas veces el forjado de piezas cuando se trata de series reducidas porque es más económico realizar un mecanizado de desbaste general de la pieza y un posterior acabado fino que un proceso de forja

La posibilidad de la deformación en caliente si se hace a temperatura superior a la transformación alotrópica que es equivalente a la de los aceros inoxidable, puede presentar en algunos casos superelasticidad.

Ejemplo de piezas forjadas pueden ser las siguientes:

- Bielas de motores de automóviles de competición
- Prótesis e implantes médicos
- Cabezas de palos de golf
- Turbinas de turbo-compresores
- Accesorios para tuberías

5.1.3 Soldadura

A la hora de afrontar la soldadura de piezas de titanio hay que tener en cuenta que si se supera la temperatura de fusión, puede sufrir una decoloración porque reacciona fácilmente en contacto con los gases atmosféricos.



Esta decoloración puede suponer pérdida de ductilidad y de resistencia mecánica. Por lo tanto es muy importante que en la soldadura se proteja la zona de soldadura con gases inertes.

También perjudican la soldadura los contaminantes de las superficies a soldar, tales como óxido, polvo, limaduras y virutas, por lo que deben eliminarse por baño de decapación, mecanizado pulido o chorro de arena, la soldadura debe limpiarse con paño de acetona, o cepillo de acero inoxidable.

El Titanio de grado 2 y 5 poseen una buena soldabilidad aunque pierden un poco de valor de sus propiedades mecánicas con respecto al metal base.

El equipo de soldadura con arco de gas inerte para Titanio (TIG, MIG) es similar a los equipos utilizados para soldar acero, aunque se requiere una mejor protección del gas inerte. En caso de piezas críticas donde la protección gaseosa sea difícil puede ser necesario realizar la soldadura en una cámara de soldadura.

Para la verificación de piezas soldadas se puede recurrir a los métodos tradicionales de rayos X, ultrasonidos o líquidos penetrantes.

Los procesos de soldadura que admite el titanio son:

- Fricción.
- Soldadura con rayo de electrones.
- Soldadura por rayo láser.
- Soldadura por plasma.
- Soldadura por puntos
- Soldadura por arco con electrodo consumible o no.
- Procesos por fusión, control con atmósfera inerte, o en vacío. No fundentes.



5.1.4 Extrusión

Extrusión es, en general, la acción de dar forma o moldear una masa haciéndola salir por una abertura especialmente dispuesta

El Titanio y sus aleaciones permiten ser extruidos, pudiendo obtener diversos perfiles tanto para acabados en bruto como para piezas finales. La técnica de extrusión es particularmente recomendable para la producción de pieza largas y de sección compleja.

5.1.5 Embutición

La embutición es una técnica de moldeo de metales en caliente que permite fabricar piezas complejas en una sola operación con la acción conjunta de una prensa y el molde o troquel adecuado a la pieza que se quiere fabricar. Para facilitar la embutición es necesario que el material tenga una gran elongación a la tracción, que se trate de materiales policristalinos de grano fino a altas temperaturas. Esta propiedad la tiene la aleación de Titanio de grado 5 Ti_6Al_4V .

La técnica consiste colocar la pieza a moldear entre las dos mitades del troquel o molde, a la temperatura que permita la mejor superplasticidad del material. Se insufla argón caliente en la parte superior del molde y se fuerza la lámina de Titanio contra la parte interior del troquel.

Esta técnica es adecuada solo para lotes de piezas muy grandes, dado la carestía de los troqueles y moldes, pero tiene la ventaja de que el tiempo de conformación de la pieza es muy corto, reduciendo así el periodo de lanzamiento del producto, así como eliminando tareas de mecanizado posteriores y reduciendo la cantidad de materia prima utilizada.



5.1.6 Mecanizado

El mecanizado de piezas de Titanio en máquinas herramientas normales se realiza en condiciones parecidas a las que se utiliza para mecanizar acero inoxidable o aleaciones de aluminio, y las condiciones tecnológicas del mecanizado dependerán de la dureza que tenga la aleación de Titanio que se mecanice. El Titanio posee un módulo de elasticidad menor que el del acero y por tanto es más elástico por lo que las piezas pueden tender a doblarse. Hay que refrigerar el mecanizado con un refrigerante adecuado teniendo en cuenta que el Titanio es mal conductor térmico y por tanto difícil de refrigerar, pudiendo deteriorar el filo de corte de las herramientas a consecuencia de las altas temperaturas en la zona de corte.

5.1.7 Fresado químico

Las piezas de Titanio permiten el fresado químico de tal manera que se puede conseguir una gran precisión en dicha operación. Para esta tarea se utiliza un ataque de ácido de superficie, selectivo y controlado. Las zonas de material que no deben ser fresadas se protegen con una capa de elastómero de neopreno o de copolímero de isobutileno-isopropileno.

5.1.8 Rectificado de precisión

Los rectificadores de precisión deben realizarse con muelas abrasivas muy reavivadas, con el mayor diámetro y espesor posible, duras y con gran potencia y velocidades lineales adecuadas. Para el rectificado cilíndrico se recomiendan muelas con alúmina y un refrigerante adecuado de chorro de gran caudal que sea muy bien filtrado y cambiarlo a menudo.

5.1.9 Pulvimetalurgia

La pulvimetalurgia o metalurgia de polvos es un proceso de fabricación que, partiendo de polvos finos y tras su compactación para darles una forma determinada (compactado), se calientan en atmósfera controlada (sinterizados) para la obtención de la pieza.



Estructura característica del Titanio puro



La pulvimetalurgia del Titanio se utiliza para la fabricación de piezas complejas de espesores muy pequeños, por ejemplo menores de 1 mm, donde se exijan acabados superficiales muy finos.

Se puede conseguir pulvititanio de base mediante las siguientes técnicas:

- Sinterizado compactado en frío
- Sinterizado prensado isostático en frío
- Prensado isostático en caliente
- Prensado en caliente al vacío



5.2 Tratamientos del Titanio

5.2.1 Tratamiento termoquímico: Nitruración

El tratamiento termoquímico de nitruración del Titanio puro y de la aleación Ti_6Al_4V produce una capa lisa y homogénea, con incrementos de la dureza superficial de hasta un 500% respecto al material no tratado.

La capa de nitruros formada tiene un espesor de 2-3 mm, en tres horas de tratamiento, formada por pequeños granos de nitruros con diámetros del orden de los 50-100 nm. El componente principal de la capa es nitruro de Titanio (Ti_2N)

Este tipo de tratamiento tiene gran utilidad en las aplicaciones biomédicas del Titanio y en los componentes de motocicletas y automóviles de competición: bielas, válvulas, etc.

Las piezas a tratar se colocan en una cámara en vacío y son sometidas a una temperatura de 500 °C. Se inyecta nitrógeno, que en contacto con iones de Titanio, reaccionan para formar nitruro de Titanio, presentando al final del proceso un color dorado. Con esta técnica la dureza superficial puede aumentar hasta 2600 HRB. Las piezas nitruradas tienen una gran resistencia a la corrosión.

5.2.2 Tratamiento superficial

Como tratamientos superficiales del titanio se pueden citar los siguientes:

- Lubricación
- Oxidación térmica
- Anodización
- Electroplaqueado
- Ionización



Cuando se produce deslizamiento de superficies de Titanio sobre Titanio o cualquier otro metal, se manifiesta una gran tendencia a la excoiación, por lo que se requiere en esos casos lubricar las superficies de contacto con lubricantes de película seca a base de disulfuro de molibdeno, grafito o similares. Donde más se aplica este tipo de lubricación es en tornillos y pernos roscados.

Un método de mejorar las propiedades superficiales del Titanio, concretamente la mejora de la resistencia a la corrosión, es cuando se somete el Titanio a un tratamiento superficial de oxidación que, además, puede originar una variedad de colores muy atractiva que amplía las posibilidades del Titanio en el sector de la joyería y de la decoración. Existen distintas técnicas para llevar a cabo la oxidación superficial del Titanio para producir su coloración, como son el tratamiento térmico, el procesado con plasma o la oxidación electrolítica.

Ya existe una alternativa a los métodos tradicionales de oxidación que consiste en que el tratamiento superficial se realice con láser. Esta técnica presenta una gran resolución espacial, rapidez de procesado y ausencia de contacto material con la pieza a tratar. Además, la posibilidad de irradiar zonas de difícil acceso y la versatilidad de los sistemas de marcado proporcionan al láser una gran aplicabilidad en la coloración del Titanio. El proceso de láser también puede ser empleado posteriormente al proceso de anodizado para escribir, grabar y marcar.

El proceso de anodización es una técnica que se utiliza para aumentar el grosor de la capa de óxido y constituye una solución eficaz y poco costosa para piezas que no estén sometidas a un desgaste continuo. Si durante la anodización se depositan polímeros de bajo coeficiente de rozamiento se aumenta la dureza superficial de la pieza.



Estructura característica del Titanio puro



El tratamiento superficial de ionización se realiza en frío y consiste en acelerar en vacío iones de nitrógeno y hacerlos impactar contra la superficie tratada. Con este procedimiento la dureza superficial aumenta hasta 1500 HV. Esta técnica da muy buenos resultados en el tratamiento de engranajes y tornillería.



Estructura característica del Titanio puro



CAPITULO 6

METALOGRAFIA



6.1 Metalografía

La metalografía es la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación. Sin duda, el microscopio es la herramienta más importante del metalurgista tanto desde el punto de vista científico como desde el técnico. Es posible determinar el tamaño de grano, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del metal y, bajo un conjunto de condiciones dadas, podrá predecirse su comportamiento esperado.

Una metalografía consiste en realizar un estudio de la microestructura del material, además que una vez realizada conoceremos ciertas características de la aleación como lo es: el tamaño de grano, los granos de frontera, la fase o fases características de la aleación, etc.

La experiencia ha demostrado que el éxito en el estudio microscópico depende en mucho del cuidado que se tenga para preparar la muestra. El microscopio más costoso no revelará la estructura de una muestra que haya sido preparada en forma deficiente. El procedimiento que se sigue en la preparación de una muestra es comparativamente sencillo y requiere de una técnica desarrollada sólo después de la práctica constante. El último objetivo es obtener una superficie plana, sin ralladuras, semejante a un espejo.



6.2 Examen microscópico de los metales

Los detalles de la estructura de los metales no son fácilmente visibles, pero las estructuras de grano de los metales pueden verse con un microscopio Figura 1.28. Las características del metal, el tamaño de grano y el contenido de carbono pueden determinarse estudiando la micrografía.

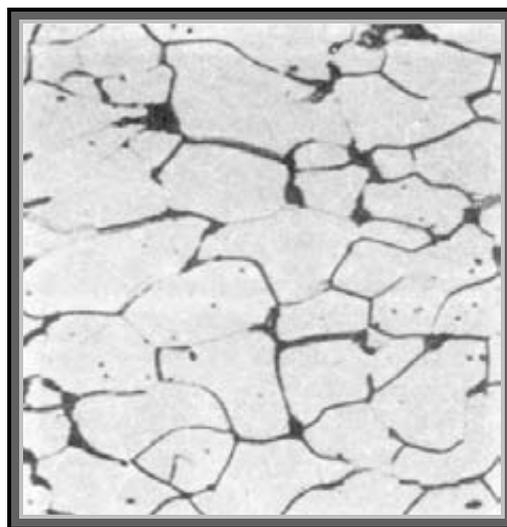


Figura 1.28. Porcentaje de carbón perlita (zonas oscuras), vistas a través de un microscopio metalúrgico.



El porcentaje aproximado de carbón puede estimarse por medio de porcentaje de perlita (zonas oscuras). Para este propósito, se utilizan un microscopio metalúrgico y técnicas asociadas de foto microscopia. El microscopio metalúrgico de luz reflejada es similar a aquellos utilizados para otros propósitos, excepto que contiene un sistema de iluminación dentro del sistema de lentes para proveer iluminación vertical.

Algunos microscopios también tienen un retículo y una escala micrométrica para medir la imagen aumentada. Otro retículo que se utiliza contiene los diferentes tamaños de grano a aumentos de 100X y se utiliza para comparar o medir el tamaño de grano relativo. Los filtros y polarizadores se utilizan en la iluminación o el sistema óptico para reducir el brillo y mejorar la definición de las estructuras de grano. En poder de aumento del microscopio puede determinarse si se multiplica el poder de la lente objetivo por el del ocular. Por tanto, un lente objetivo de 40X con un ocular de 12.5X agrandaría la imagen hasta 500X (500 diámetros).

Los microscopios de platina invertida ofrecen un diseño más moderno. En este instrumento la muestra se coloca boca abajo en la platina. Se utiliza un microscopio de platina invertida, junto con una cámara de video y un monitor de TV de circuito cerrado. El poder 400 del microscopio, pero se pierde algo de resolución. La mayor ventaja de este arreglo se obtiene en la visualización de grupo. Los instrumentos de metalografía también permiten una observación en grupo del aumento metalúrgico. La imagen se proyecta sobre una pantalla de brillo mate. En los grandes laboratorios metalúrgicos se utilizan modelos de gran tamaño. Muchos instrumentos metalográficos tienen la capacidad de producir microfotografías de color instantáneas o estándar.

Para obtener fotografías existen adaptadores para la mayoría de los microscopios. Los acaparadores de manga sencilla pueden utilizarse con una cámara SLR de 35mm para la toma de foto micrografías. Con este arreglo simple, el obturador se abre y se permite la entrada de la luz durante pocos segundos (6 a 8 segundos con una película Panatomic-X de 32 ASA).



6.3 Tamaño de grano

El tamaño de grano tiene un notable efecto en las propiedades mecánicas del metal. Los efectos del crecimiento de grano provocados por el tratamiento térmico son fácilmente predecibles. La temperatura, los elementos aleantes y el tiempo de impregnación térmica afectan el tamaño del grano.

En metales, por lo general, es preferible un tamaño de grano pequeño que uno grande.

Los metales de grano pequeño tienen mayor resistencia a la tracción, mayor dureza y se distorsionan menos durante el temple, así como también son menos susceptibles al agrietamiento. El grano fino es mejor para herramientas y dados. Sin embargo, en los aceros el grano grueso incrementa la endurecibilidad, la cual es deseable a menudo para la carburización y también para el acero que se someterá a largos procesos de trabajo en frío.

Todos los metales experimentan crecimiento de grano a altas temperaturas. Sin embargo, existen algunos aceros que pueden alcanzar temperaturas relativamente altas (alrededor de 982°C) con muy poco crecimiento de grano, pero conforme aumenta la temperatura, existe un rápido crecimiento de grano. Estos aceros se conocen como aceros de grano fino. En un mismo acero puede producirse una gama amplia de tamaños de grano.

6.4 Clasificación de los tamaños de grano

Existen diversos métodos para determinar el tamaño de grano, como se ven en un microscopio.

El método que se explica aquí es el que utiliza con frecuencia los fabricantes. El tamaño de grano se determina por medio de la cuenta de los granos en cada pulgada cuadrada bajo un aumento de 100X. La Figura 1.29, es una carta que representa el tamaño real de los granos tal como aparece cuando se aumenta su tamaño 100X. El tamaño de grano especificado es por lo



general, el tamaño de grano austenítico. Un acero que se temple apropiadamente debe exhibir un grano fino.

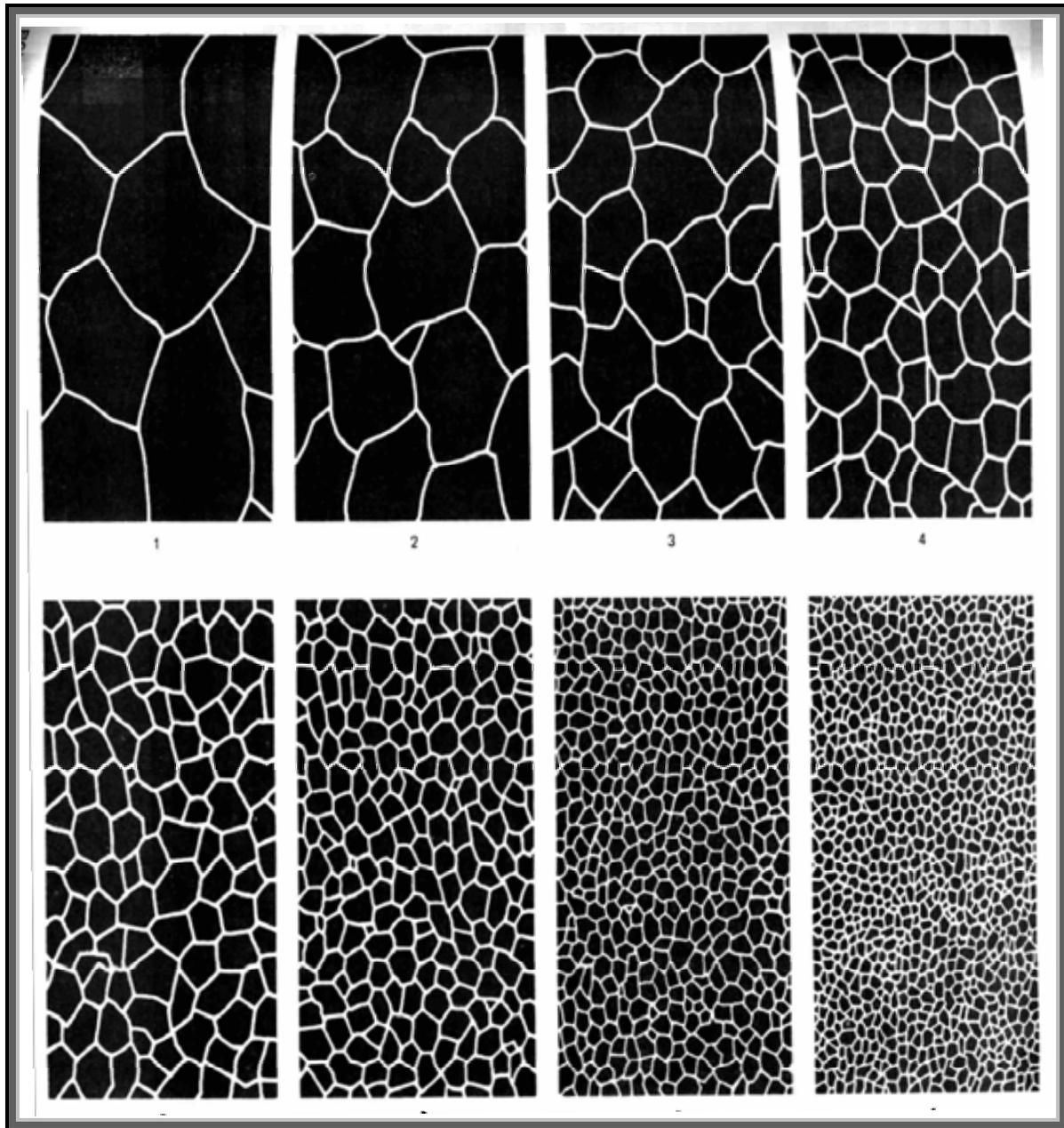


Figura 1.29. Tamaño real de los granos cuando se aumenta su tamaño 100X.



Estructura característica del Titanio puro



CAPITULO 7

DESARROLLO EXPERIMENTAL



7.1 Desarrollo experimental

Objetivo

Identificar la estructura característica del Titanio 99.5 % puro a temperatura ambiente, e identificar el cambio de fases presentes y explicar dicho comportamiento, además de realizar el estudio de la dureza del Titanio puro.

Explicar detalladamente el procedimiento para llevar a cabo el estudio de la Metalografía del Titanio, con el propósito de ver la importancia del cuidado que se debe tener este tipo de estudio debido al tipo de acabado y del material con el que se está trabajando.

Material requerido:

Titanio puro 99.5%

Cortadora de diente fino.

Maquina pulidora rotatoria.

Microscopio metalografico.

Cámara fotográfica de 35mm.

Alúmina fina, lijas de diversos números.

Acido fluorhídrico.

**Características del Titanio puro.**

El Titanio en su forma más pura se encuentra comercialmente con una pureza alrededor del 99.5% y tiene la siguiente composición química:

Ti %	Grado	# ASTM	% C	% Fe	% N	% O	% H
99.5	1	B 265	0.08	0.20	0.03	0.18	0.15

Tabla 1.7. Composición química del Titanio puro (99.5%)

Y cuenta con las siguientes características a temperatura ambiente 21 °C.

Estado	solido
Densidad	4.54 g/cm ³
Punto de fundición o fusión	1,668 °C
Modulo de elasticidad	16.8 x 10 ⁶ lb/pulg. ²
Calor específico	520 J/(kg.k)
Peso atómico	47.867 uma
Conductividad eléctrica	2.38 MS-m-1
Conductividad térmica	21.9 w/(m-k)
Electronegatividad	1.54 (Pauling)
Paramagnético	no se imanta
Resistente a la corrosión y a la oxidación	

Tabla 1.8. Características del Titanio puro a temperatura ambiente (21°C)



El Titanio es un material soldable utilizando los métodos convencionales usados en aceros inoxidable, solo que a diferencia de estos se debe de controlar la temperatura del Titanio, ya que si supera la temperatura de fusión, reacciona fácilmente con los gases atmosféricos y esto puede suponer una pérdida de ductilidad y resistencia mecánica.

En general el Titanio posee grandes facilidades para ser trabajado en frío o en caliente.

Cuando se trabaja en caliente se exige controlar rigurosamente la temperatura con la que se trabaja, para obtener un control exacto de la estructura de la pieza y de sus propiedades.

Se pueden forjar piezas de cualquier aleación de Titanio con estructura de grado único y con una resistencia y dureza direccionales o localizadas.

El Titanio pertenece a una familia de aleaciones diseñadas para resistir un gran nivel de corrosión gracias a las características que contiene en su estructura, sin embargo es necesario añadir otros elementos para que el Titanio obtengan ciertas características que nos permitan implementarlos en otras áreas, entre estos elementos encontramos: níquel, molibdeno, manganeso, vanadio, etc.

Estos elementos afectan de forma muy particular, el tipo de fase y la microestructura del material, es por esto la importancia de realizar una Metalografía, ya que de acuerdo al tipo de microestructura y de fases presentes en el material, se determinara la aplicación y las características que posee.

Para esto se pensó en realizar un estudio en la cual pudiéramos observar una pieza cuyas características fueran conocidas y así hacer la prueba de comprobación de los granos de la muestra en este caso fue Titanio puro cuyo procedimiento se explican a continuación.



1.- Corte del Material: La orientación de la superficie a examinar es de suma importancia, ya que de acuerdo al corte que se realice sobre el material, la estructura se podrá observar de diferente manera. El método para cortar debe ser aquel que minimice la deformación y el calentamiento del área de corte, ya que en ambos casos esto podría afectar la superficie que se examina.

Los materiales blandos (de durezas menores a 35 Rc) pueden seccionarse por aserrado, pero los materiales más duros deben cortarse con un disco abrasivo. Las sierras de corte metalúrgico con hojas abrasivas y flujo de refrigerante son las herramientas que se usan para este propósito. La muestra no debe sobrecalentarse, no importa si es dura o blanda. Las estructuras de grano pueden alterarse con una alta temperatura de corte.

Las muestras pequeñas o de forma incómoda deben montarse de alguna manera para facilitar el pulido intermedio y final. Alambres, varillas pequeñas, muestras de hoja metálica, secciones delgadas, etc. Deben montarse en un material adecuado o sujetarse rígidamente en una montadora mecánica.

El corte del material se realizó por medio de una sierra de arco estándar y se requirió de la aplicación de un sistema de enfriamiento para evitar que la muestra se sobrecalentara y se alterara las fases presentes, se realizaron dos cortes, uno en la sección transversal y uno de forma longitudinal, se prepararon 3 muestras de 2 cm. de largo por 1 cm de ancho y con un espesor de 0.5 cm.

2.- Esmerilado: El esmerilado se realiza para remover todo el material o imperfecciones que quedan sobre el corte, esto con el fin de dejar un área totalmente plana, además se usa una serie de lijas para complementar esta operación, es importante señalar que el proceso se debe realizar de la lija más gruesa a la delgada, y siempre utilizando agua como refrigerante sobre el material, con el fin de evitar algún cambio en la microestructura del material debido al calor.



3.- Forma de Montar el Material (Encapsulamiento): El material debe de ser montado sobre un material químicamente inerte respecto al material que se analiza, las temperaturas en las que se lleva a cabo el proceso de montar el material no deben afectar la estructura del mismo, a menudo, se utiliza los plásticos termo fijos conformándolos con calor y presión alrededor de la muestra. La resina termo fijada que más se emplea para montar muestras es la baquelita.



Figura 1.30. Encapsulamiento de las muestras.

4.- Forma de Pulir el Material: Los granos y otras características de los metales no pueden verse al menos que la muestra se desbaste y se pule para eliminar las ralladuras. Se utilizan diferentes métodos de pulido tales como el electrolítico, el rotatorio o el de vibración. El procedimiento más común consiste en desbastar primero la superficie de la muestra en una lijadora de la banda y luego a mano con papel abrasivo de varios grados.



Con el paso del tiempo, esta operación ha ido sofisticándose día con día, en la actualidad existe maquinaria para realizar la operación de forma automática, sin embargo el principio es el mismo, la pieza a examinar debe de contar con un acabado superficial excelente (acabado de espejo), esto se logra mediante la utilización de un abrasivo fino, usualmente Alúmina (Al_2O_3), la cual se coloca sobre un disco rotatorio cubierto de un paño y ejerciendo la presión correcta entre la pieza y el paño se logra el acabado deseado.



Figura 1.31. Máquina rotatoria para pulir las muestras.

Se pulieron las probetas con los cortes, para esto se utilizó un disco giratorio con paño en su parte superior, se utilizó Alúmina gruesa en un principio para eliminar la mayor parte de imperfecciones sobre la superficie y después se utilizó Alúmina fina para darle el acabado final.

La muestra se pule sobre una serie de hojas de esmeril o lija con abrasivos más finos, sucesivamente.



El primer papel es generalmente N. 180, 220, 320, 400, 600, 800 y 1000. Por lo general, las operaciones de pulido intermedio con lijas de esmeril se hacen en seco; sin embargo, en ciertos casos, como el de preparación de materiales suaves, se puede usar un abrasivo de carburo de silicio. Comparado con el papel esmeril, el carburo de silicio tiene mayor rapidez de remoción y, como su acabado es a base de resina, se puede utilizar con un lubricante, el cual impide el sobrecalentamiento de la muestra, minimiza el daño cuando los metales son blandos y también proporciona una acción de enjuague para limpiar los productos removidos de la superficie de la muestra, de modo que le papel no se ensucie.

El tiempo utilizado y el éxito del pulido fino dependen en mucho del cuidado puesto durante los pasos de pulido previo. La última aproximación a una superficie plana libre de ralladuras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas cuidadosamente seleccionadas en su tamaño. Existe gran posibilidad de abrasivos para efectuar el último pulido. En tanto que muchos harán un trabajo satisfactorio parece haber preferencia por la forma gama del óxido de aluminio para pulir materiales ferrosos y de los basados en cobre, y óxido de serio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones.

Otros abrasivos para pulido final que se emplean a menudo son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio.

La selección de un paño para pulir depende del material que vaya a pulirse y el propósito del estudio Metalográfico. Se pueden encontrar paños de lanilla o pelillo variable, desde aquellos que no tienen pelillo (como la seda) hasta aquellos de pelillo intermedio (como paño de ancho, paño de billar y lonilla) además de aquellos de pelillo profundo (como el terciopelo). También se pueden encontrar paños sintéticos para pulir con fines de pulido general, de los cuales el gamal y el micro paño son los que se utilizan más ampliamente. Una muestra pulida en forma de cuadro mostrará únicamente las inclusiones no metálicas; además, estará libre de ralladuras.

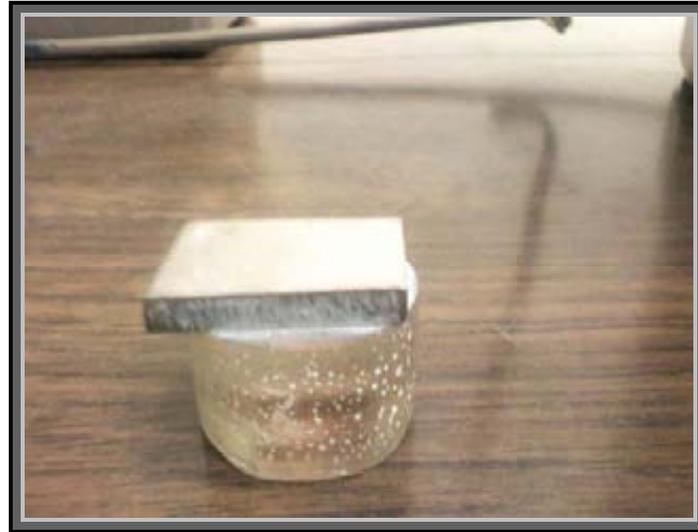


Figura 1.32. Acabado tipo espejo.

5.- Ataque del Material: El ataque del material consiste en utilizar un agente químico que reaccione con la superficie a examinar, este es el paso de mayor importancia durante la metalografía, ya que si el agente no es el indicado, no se podrán observar las características deseadas sobre la pieza, la selección del agente químico varía según el material y sus características.

Una vez que se logro el acabado de espejo se ataco el material con un reactivo para revelar su microestructura, el cual contiene: 10 ml. de acido fluorhídrico (HF), 5 ml.de HNO_3 y 85 ml de agua (H_2O).

El propósito del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal o aleación. El proceso debe ser tal que queden claramente diferenciadas las partes de la micro estructura.

Las muestras pueden ahora atacarse durante el tiempo necesario sumergiéndolas boca abajo en una solución contenida en una caja de Petri. Un método opcional consiste en aplicar el reactivo



con un gotero para ojos. Si el tiempo de ataque es demasiado corto, la muestra quedará sub atacada y los límites de grano y otras configuraciones se verán desvanecidos e indistintos cuando se observen en el microscopio. Si el tiempo de ataque es demasiado largo, la muestra se sobre atacará y quedará muy oscura, mostrando colores no usuales. El tiempo de ataque debe controlarse muy cuidadosamente.

La acción del ataque se detiene al colocar la muestra bajo una corriente de agua. Límpiense la muestra con alcohol y utilice una secadora de pelo para terminar de secarla. Cuídese de no frotar la muestra pulida y atacada con alguna tela o con los dedos, porque esto altera la condición superficial del metal, por la formación de rayas.



Figura 1.33. Microscopio metalográfico.



Estructura característica del Titanio puro



Figura 1.34. Toma de las fotografías a través del Microscopio.

Una vez realizado este procedimiento se tomaron 3 muestras en las cuales, se observo:

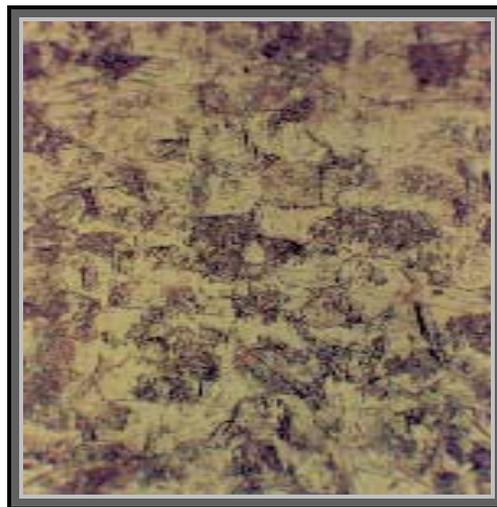


Figura 1.35. Fotografía tomada a 50X.

En esta fotografía, se observa la presencia de una fase α , como matriz y una fase β en forma de placa o forma reticular con una morfología de eutectoide.



Estructura característica del Titanio puro



Figura 1.36. Fotografía tomada a 100 X.

En esta fotografía, se observa la presencia de una estructura equiaxial de fase α de Titanio como matriz, esta estructura se aprecia en placas de tono oscuro además de fase β .



Figura 1.37. Fotografía tomada a 400 X.



La fotografía 3, presenta una estructura equiaxial de fase α como matriz con placa de fase β , además se observa maclas en esta micrografía en la fase α . esta micrografía está tomada a 400X, esto permite medir el tamaño de grano el cual corresponde a un numero 5 o 6 de acuerdo a la ASTM.

De la metalografía realizada al Titanio comercialmente puro se observa la presencia de una fase α (alfa) y de una fase β (beta), esto se puede observar en toda la secuencia de fotografías, se presenta un tamaño de grano No. 5-6 que se observa con claridad en la micrografía de 400X, en estas fotografías del material se puede observar con claridad el flujo de grano, este tipo de flujo de grano es típico de un proceso de forja.

El Titanio es un metal de color blanco plateado y presenta alotropismo: a bajas temperaturas como en este caso se está trabajando a temperatura ambiente (21°C) se cristaliza en forma hexagonal compacta (fase α , con parámetros de red a: 0.295 nm y c: 0.468 nm) y por encima de una temperatura aproximada de 885.2 °C, se cristaliza en una estructura cúbica centrada en el cuerpo.

A una temperatura de 900 °C la fase β tiene un parámetro de red de 0.332 nm. Esta transformación alotrópica hace posible la realización de tratamientos térmicos con transformación total.



Dureza Rockwell

El método consiste en hacer una indentación en una probeta con un penetrador de diamante esferocónico o un penetrador esférico de acero, aplicando sucesivamente dos cargas y determinándose la profundidad permanente de la huella que se produjo bajo las condiciones específicas de una carga menor, y una mayor.

Numero de dureza Rockwell

Es un número obtenido por el aumento neto de la profundidad de la huella; el cual proviene cuando se aumenta la carga sobre un penetrador desde una carga fija menor hasta una mayor, retornando después a la carga menor.

Los números de dureza Rockwell se expresan siempre con un símbolo de escala, que indica el penetrador y la carga utilizada.

Maquina y equipo

La máquina de prueba consiste en un soporte rígido o yunque, sobre el que se coloca la probeta y un dispositivo que aplica las cargas prefijadas a un penetrador en contacto con la misma.

Penetrador esférico de acero

Este tipo de penetrador debe emplearse en los ensayos de dureza para las escalas B, E Y F.

Consiste en un balín de acero templado y pulido, con un diámetro de 1.588 mm \pm 0.003 mm; excepto para la escala E, que tiene un diámetro de 3.175 mm \pm 0.004 mm. Dicho balín debe estar pulido y no debe presentar defectos superficiales.

Debe eliminarse y anularse la prueba si presenta una deformación mayor a la tolerancia indicada anteriormente o cualquier otro defecto superficial.

En los dos tipos de penetrador debe evitarse la acumulación en el penetrador de: polvo, tierra, grasa o capas de óxidos, dado que esto afecta los resultados de la prueba.



Preparación de la superficie.

La preparación del material bajo prueba debe controlarse cuidadosamente para evitar cualquier alteración en su dureza, tal como la que puede ser causada por calentamiento durante el esmerilado o por endurecimiento durante operaciones de maquinado y pulido. La superficie de prueba de la probeta debe ser tal que la carga pueda aplicarse perpendicular a ella. La superficie debe estar limpia, seca, libre de óxido, porosidades y material extraño que pudiera aplastarse o fluir abajo la presión de la prueba y afectar los resultados. Si se requiere un ataque químico de la superficie de prueba, este debe ser no más profundo que lo necesario para el estudio metalográfico. La superficie en contacto con el soporte debe estar limpia, seca y libre de cualquier condición.

Ajuste del indicador

Deben hacerse las siguientes pruebas. Se coloca una pieza del material en el soporte y se gira la tuerca de elevación del tornillo para poner el material en contacto con el penetrador. Seguir girando para llevar el material hasta que la mano sienta resistencia positiva al giro esto sucede después de que la carga menor de 98N (10kgf) se aplica.

Aplicación de la carga menor

Debe colocarse la probeta sobre el soporte y aplicar la carga menor gradualmente hasta que se obtenga la indicación apropiada en la carátula. Esto se obtiene cuando el indicador haya dado el número apropiado de revoluciones completas y quede dentro de 5 divisiones de la posición de ajuste en la parte superior de la carátula.

Aplicación de la carga mayor

Debe aplicarse la carga mayor accionando la palanca de operación sin impacto y dejando que gire libremente. Se retira la carga mayor llevando la palanca de operación de regreso a la posición original dentro de los 2 segundos siguientes después de que su movimiento ha cesado sin interrumpir la maniobra de regreso.



Lectura de la escala para dureza Rockwell

Debe considerarse la dureza Rockwell como la lectura del indicador en la escala apropiada de la carátula, después de que se ha quitado la carga mayor y mientras la carga menor aun está actuando. Estas lecturas se estiman a veces a la mitad de una división, dependiendo del material que se pruebe.

En esta ocasión se utilizo la escala de dureza Rockwell B con un penetrador de bola de 1/16, y se hicieron 20 tomas de dureza para comprobar que la dureza promedio del material es la adecuada.

Las lecturas del ensayo de dureza fueron:

DUREZA ROCKWELL OBTENIDA			
toma 1	69.5	toma 11	73.5
toma 2	71.5	toma 12	72.0
toma 3	72.0	toma 13	72.5
toma4	72.5	toma 14	71.0
toma 5	70.0	toma 15	70.5
toma 6	69.5	toma 16	71.5
toma 7	71.5	toma 17	69.0
toma8	71.5	toma 18	69.5
toma 9	72.5	toma 19	69.0
toma 10	73.0	toma 20	70.5
DUREZA PROMEDIO 71.12 HRB			

Tabla 1.9.- Dureza promedio del titanio puro.

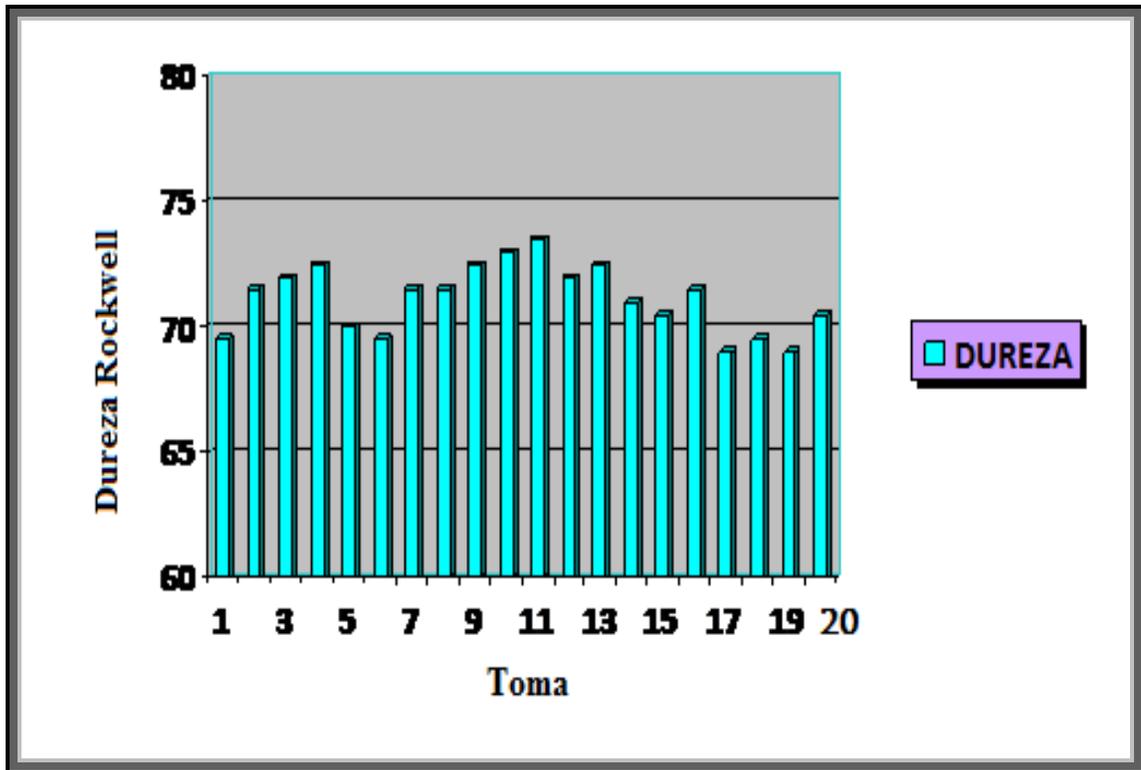


Tabla 1.9. Grafica de la dureza promedio del Titanio.



DISCUSION DE RESULTADOS

La estructura del Titanio puro se presenta en forma equiaxial en la fase α , con placas y agujas de fase β , las cuales se pueden considerar como una morfología de martensita.

La cual se cataloga como α' o α'' . La fase α presenta maclas que son apreciadas en forma de placas, se puede considerar como maclas formadas por trabajo mecánico.

Podemos considerar el trabajo mecánico ya que el tamaño de grano es pequeño por ser 5 o 6 ASTM.

La macrodureza una vez que ha sido tomada con Rockwell, es el resultado de una mezcla de fases, pero está dentro de los límites ya publicados en el Hadbook de la ASTM.



CONCLUSIONES

Una vez desarrollado esta investigación se comprobó que el Titanio comercialmente puro es un metal que presenta una mezcla de fases por su propiedad de ser alotrópico.

Por el número de dureza que presenta el Titanio puro se puede considerar entre los metales maquinables.

Aunque el Titanio consta de fases α y β , su dureza es relativamente baja ya que 71.12 HRB, se considera como material maquinable y deformable.

Los mayores beneficios que este metal nos ofrece es en conjunto con otros metales en forma de aleación, en la industria energética sobre todo por el gran resistencia a temperaturas extremas, y poco nivel de corrosión, además de las aplicaciones Biomédicas por ser un metal no toxico.



GLOSARIO

Abrasivo.- Sustancia utilizada para esmerilar, bruñir, pulir, chorros a presión o terminado por tratamiento en cilindros giratorios.

Acero.- Aleación de base hierro, maleable en algún intervalo de la temperatura a la que fue inicialmente fundida, contiene manganeso generalmente carbono y a menudo otros elementos de aleación.

Alotropía.- Fenómeno reversible mediante el cual ciertos metales pueden existir en más de una estructura cristalina. Si o es reversible el fenómeno se llama “polimorfismo”.

Aleación.- Sustancia con propiedades metálicas y compuestas por dos o más elementos químicos, de los cuales por lo menos uno es un metal elemental.

Angstrom.- (A, AU) 10^{-8}

Austenita.- Solución sólida de uno o más elementos en hierro cúbico centrado en la cara, en general se supone que el carbono es el soluble.

Carburo.- Compuesto de carbono con uno o más elementos metálicos.

Cedencia.- Primer esfuerzo en un material, generalmente menor que el máximo esfuerzo que se puede obtener, en el que ocurre un incremento de deformación sin aumento de esfuerzo.

Cementita.- Compuesto de hierro y carbono conocido químicamente como carburo de hierro con la fórmula química aproximada Fe_3C . Se caracteriza por una estructura cristalina ortorrómbica.

Corrosión.- Deterioración de un metal mediante reacción química o electroquímica con su ambiente.

Cristalización.- Separación generalmente desde una fase líquida al enfriar, de una fase sólida cristalina.



Deslizamiento.- Deformación plástica mediante el desplazamiento irreversible cortante (traslación) de una parte de un cristal en relación con otra en una dirección cristalográfica definida y generalmente en un plano cristalográfico definido.

Dislocación.- Defecto lineal en la estructura de un cristal.

Ductilidad.- Capacidad de un material para deformarse plásticamente sin fracturarse, medida por la elongación o reducción de área en una prueba tensil.

Dureza.- Resistencia del metal a la deformación plástica generalmente por endentación.

Elasticidad.- Propiedad de un material en virtud de la cual tiende a recuperar su tamaño y forma originales después de la deformación.

Elongación.- Es una prueba tensil, incremento a la longitud calibrada de la muestra medida después de la fractura de la muestra en algún punto dentro de la longitud calibrada.

Endurecimiento.- Incrementar la temperatura mediante un tratamiento adecuado, generalmente incluye calentamiento y enfriamiento.

Envejecido.- En un metal o aleación, en propiedades que generalmente ocurre con lentitud a temperatura ambiente y con más rapidez a temperaturas superiores.

Esfuerzo.- Fuerza por unidad de área, a menudo pensada como la fuerza que actúa en una pequeña área dentro de un plano.

Estructura de red.- Estructura en la que un constituyente se forma sobre todo en las fronteras de grano, envolviendo de este modo parcial o completamente los granos de los otros constituyentes.

Estructura Widmanstätten.- Estructura caracterizada por una forma geométrica resultante de la formación de una nueva fase a lo largo de ciertos planos cristalográficos de la solución sólida padre.



Eutectoide.- a) Reacción isotérmica reversible en la que una fase sólida (generalmente una solución sólida) se convierte en dos o más sólidos íntimamente mezclados al enfriar cuyo número de sólidos formados es el mismo que el de componentes en el sistema.

Fase.- Porción físicamente homogénea y distinta de un sistema de un material.

Fatiga.- Fenómeno que origina la fractura bajo esfuerzos repetidos o fluctuantes con un valor máximo menor que la resistencia tensil del material.

Ferrita.- Solución sólida de uno o más elementos en hierro cúbico centrado en el cuerpo, en general se supone que el soluble es el carbono.

Fluencia.- Deformación dependiente del tiempo que ocurre bajo la aplicación de esfuerzos.

Fragilidad.- Calidad de un material que da lugar a la propagación de fisuras sin deformación plástica apreciable.

Grano.- Cristal individual en un metal o aleación policristalina.

Laminación.- Reducir el área de la sección transversal de una barra de metal, o conformar productos de metal, mediante el empleo de rodillos en rotación.

Macla.- Dos porciones de un metal con una relación cristalográfica definida: una puede considerarse como el padre y la otra como la macla o el gemelo.

Maleabilidad.- Característica de los metales que permite una deformación plástica en compresión sin ruptura.

Martensita.- Es una solución sólida intersticial sobresaturada de carbono en hierro, con una red tetragonal centrada en el cuerpo. Su microestructura se caracteriza por una forma acircular tipo aguja.

Matriz.- Fase o agregado principal en la que se introduce otro constituyente.



Metal.- Sustancia química elemental opaca y lustrosa que es buen conductor del calor y de la electricidad, y cuando se ha pulido es un buen reflector de la luz.

Microestructura.- Estructura de metales pulidos y atacados químicamente revelada por un microscopio a una ampliación mayor de diez diámetros.

Modulo de elasticidad.- Medida de la rigidez de un metal: razón del esfuerzo, dentro del límite proporcional, a una deformación correspondiente.

Parámetro (red).- En un cristal, longitud generalmente en unidades angstrom, de la celda unitaria a lo largo de uno de sus ejes o bordes: también se llama constante de la red.

Perlita.- Agregado laminar de ferrita y cementita que a menudo se presenta en acero y hierro fundido.

Puntos de fusión.- Temperatura a la que un metal puro, compuesto o eutéctico cambia de sólido a líquido; temperatura a la que el líquido y el sólido están en equilibrio.

Recocido.- Calentar y mantener a una temperatura adecuada y luego enfriar a una rapidez apropiada, para reducir la dureza, mejorar la maquinabilidad, facilitar el trabajo en frío, producir una microestructura deseada u obtener las propiedades deseadas mecánicas, físicas u otros.

Soluble.- Componente de una solución sólida o de una solución líquida presente en una extensión menor o más pequeña: componente disuelta en el solvente.

Temperatura de transición.- Temperatura arbitrariamente definida dentro del intervalo de temperatura en la que las características de, fractura del metal determinadas generalmente por ensayos muescados cambian con rapidez. Algunas veces también se emplea para denotar la temperatura arbitrariamente definida en un intervalo en la que la ductilidad cambia en forma rápida con la temperatura.

Tenacidad.- Capacidad de un metal para absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse.



Estructura característica del Titanio puro



Vacancia.- En los materiales forjados, configuración alargada de microconstituyentes o material extraño alineado en la dirección de trabajado.



BIBLIOGRAFIA

1. - Introducción a la Metalurgia Física

Avner, S.

Editorial Mc Graw Hill, 1978

2. - Structure and properties of alloys

R. M. Brick, R. B. Gordon y A. Phillips

McGraw-Hill Book Company, 3a. ed. Nueva York, 1965

3.-Constitution binary alloys

Max Hansen

McGraw-Hill Book Company, 2a. ed. Nueva York, 1958

4. - Metals Handbook, vol. 1

American Society for Metals, 1961

5. - Metals Handbook, vol. 2 Properties and selection: Nonferrous alloys and pure Metal.

American Society for Metals, 1961

6. - Metals Handbook, vol. 7, Atlas of micro-structures

American Society for Metals, 1972

7.- Tratamiento Térmico de los Aceros

José Apriz Barreiro

Editorial Dossat, Madrid 1974



Estructura característica del Titanio puro



8.- Principios de Metalurgia Física

Reed-Hill, R.

Editorial CECSA, 1979

9. - Tool steel

Roberts G. y R. Cary

American Society for Metals, 1980