



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE MODIFICACIÓN SUPERFICIAL DE ALEACIONES DE TITANIO MEDIANTE RECUBRIMIENTO POR LÁSER.

AUTORA: SARA SENÓN AGOST

TUTOR: VICENTE AMIGÓ BORRÁS

Selección

Curso Académico: 2013-14

Índice de contenidos.

-Memoria.

-Presupuesto.

Memoria

Índice de la memoria.

1. Motivación y objetivos.	1
2. Panorama científico.	2
2.1 Recubrimientos superficiales por láser.....	2
2.2 Los recubrimientos por láser frente a los métodos convencionales.	6
3. El titanio y sus características.	7
4. Problema del Titanio.	18
5. Tratamientos Superficiales.....	19
5.1 Implantación iónica.	20
5.2 Proyección térmica.....	26
5.3 Evaporación.	32
5.4. Tratamientos con láser.....	38
5.4.1. Introducción.	38
5.4.2. Laser cladding.	39
6. Problemática del procesado por láser del titanio.....	50
6.1. Modificación por láser de las aleaciones de titanio.....	50
6.2. Ventajas y desventajas del procesado por láser del titanio.	62
7. Referencias.	63

1. Motivación y objetivos.

El titanio y sus aleaciones, debido a sus excelentes propiedades como la alta relación resistencia-densidad, alto módulo de Young y la alta resistencia a la corrosión entre otras, resultan muy atractivos en las industrias de biomedicina, transporte, aeronáutica y muchas otras aplicaciones de ingeniería.

Sin embargo, las aplicaciones bajo condiciones severas de desgaste son muy restringidas debido a su baja dureza y malas propiedades tribológicas. Además presentan una limitada resistencia a la oxidación a alta temperatura debido a su buena afinidad con el oxígeno a temperaturas elevadas, por lo tanto, la mejora de la resistencia al desgaste y la oxidación ha atraído una atención creciente en los últimos años.

Para mejorar estas propiedades se proponen varios tratamientos de modificación superficial, y en concreto, se desarrollan los tratamientos con láser ya que es una herramienta de elevado interés tecnológico debido a la mayor velocidad de enfriamiento y menor aporte térmico en el proceso. Además se utilizan cada vez más en la modificación de la superficie de los metales debido a su alta coherencia, direccionalidad y la alta densidad de energía. Así las desventajas de las aleaciones de titanio pueden ser mejoradas.

Es importante introducir las propiedades del titanio para comprender su problemática y justificar las ventajas de la técnica concreta de laser cladding. Exponiendo antes el estado del arte acerca de la modificación superficial por láser, no sólo mediante cladding sino con otras técnicas láser afines. Esto permitirá esclarecer los principales retos futuros y detallar la problemática específica del procesado del titanio.

Por consiguiente, los objetivos del presente proyecto son: conocer las características y propiedades del titanio para entender por qué resulta tan atractivo en las aplicaciones de ingeniería, y a su vez para saber cuáles son los problemas que presenta bajo ciertas condiciones. Además de concretar aquellos problemas que se quieren mejorar, también es objeto del trabajo proponer y explicar varios tratamientos superficiales que den solución a dichos problemas, entre ellos los tratamientos con láser, Se estudiará también su viabilidad y se compararán entre sí para conocer las ventajas y desventajas de cada uno de estos tratamientos. Finalmente, una vez conocidas las distintas técnicas, se hablará más en profundidad sobre los tratamientos con láser aplicados concretamente al Titanio.

2. Panorama científico.

Como panorama científico se explicará qué tipos de tratamiento con láser se pueden emplear actualmente y cómo se trata una pieza mediante un haz de láser. Además se comparará de forma breve el tratamiento con láser frente a otros métodos más convencionales.

2.1 Recubrimientos superficiales por láser.

El recubrimiento por láser es uno de los tratamientos de superficie más empleados actualmente. Los efectos positivos de los tratamientos de superficie por láser se basan en un cambio de la microestructura o la composición del material en las capas de la superficie debido a un ciclo térmico que es inducido por una fuente de láser en movimiento. El proceso se muestra esquemáticamente en la figura 1.

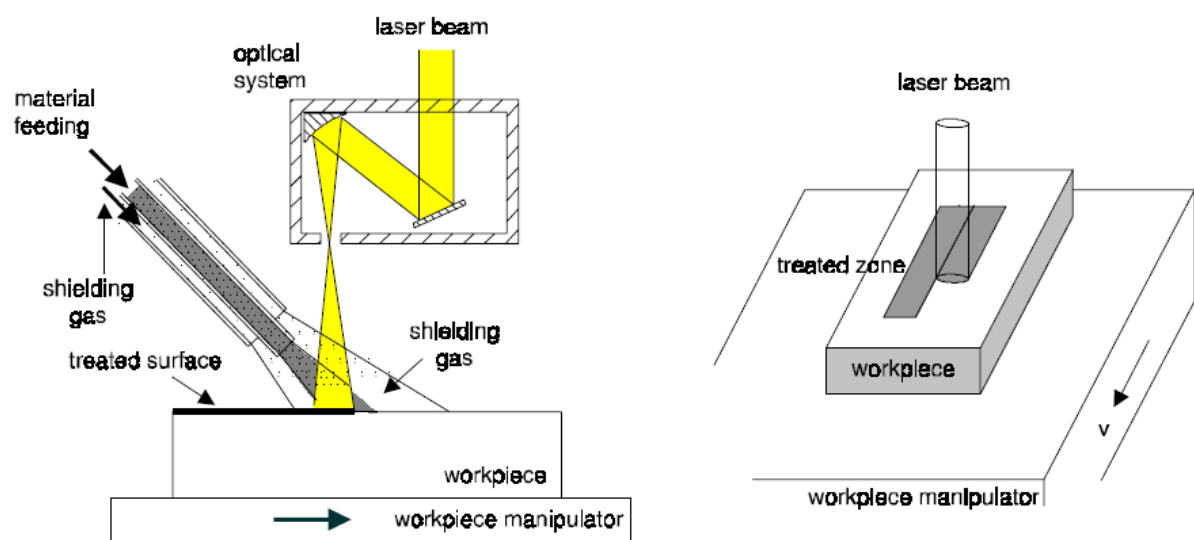


Fig.1. Tratamiento por láser de una pieza. (Schneider 1998)

Como se observa en la figura 1 el área tratada es aquella que está expuesta por el haz de láser, y aquellas áreas más grandes se pueden tratar haciendo varias pistas adyacentes. Además hay que tener en cuenta que para evitar la corrosión de la zona expuesta al láser es recomendable en algunos procesos emplear un gas de protección.

El área tratada primero se calienta por la absorción de la energía suministrada mediante el rayo láser (las tasas de calentamiento en la capa superficial son elevadas debido a la alta potencia del láser), después, una vez calentada la zona, ésta se enfría por difusión de calor.

El resultado de dicho calentamiento y enfriamiento es una capa superficial con grano más fino y fases metaestables.

Schneider et al (1998) utilizaron para investigar un láser de CO₂ con una potencia de 2kW como fuente de calor. Este nivel de potencia puede ser visto como un requisito mínimo para tratamientos de superficie con láser, de hecho en la mayoría de aplicaciones industriales la potencia del láser es superior a 5 kW, permitiendo así el tratamiento de áreas más grandes en un solo paso. La longitud de onda en un láser como éste es de 10,6 mm, por lo que provoca pérdidas por reflexión significativas. Además en procesos a temperatura ambiente sólo el 6-10% de la radiación es absorbida en una superficie sólida (Grünenwald 1996). Aunque ésta absorción se puede aumentar mediante el uso recubrimientos especiales como el grafito (Dausinger y otros, 1988).

Recientemente, se han desarrollado láseres de Nd: YAG para potencias de varios kW, siendo así útiles para tratamientos de superficie con láser. La longitud de onda de estos láseres es de 1,06 mm, por lo que son más eficientes que los de CO₂ (Stern 1990). Otra ventaja sobre el láser de CO₂ es la posibilidad de transportar el haz de láser a través de fibras ópticas, permitiendo que los sistemas de manipulación sean más flexibles.

Teniendo en cuenta estas ventajas se puede decir que este tipo de láser es muy útil para futuros tratamientos superficiales.

A continuación se explicarán los posibles tratamientos superficiales por láser, distinguiendo tres grupos: aquellos sin fusión, aquellos con fusión de la superficie y los que tienen fusión de la superficie y material adicional.

El principio de funcionamiento de los tratamientos más comunes por láser se resume en la figura 2.

Como ya se ha comentado, el efecto de los tratamientos por láser es un endurecimiento causado por un cambio en la microestructura de la capa superficial. Sin embargo, puede ser necesario o más barato aplicar una capa sobre la superficie con una composición diferente del material de base.

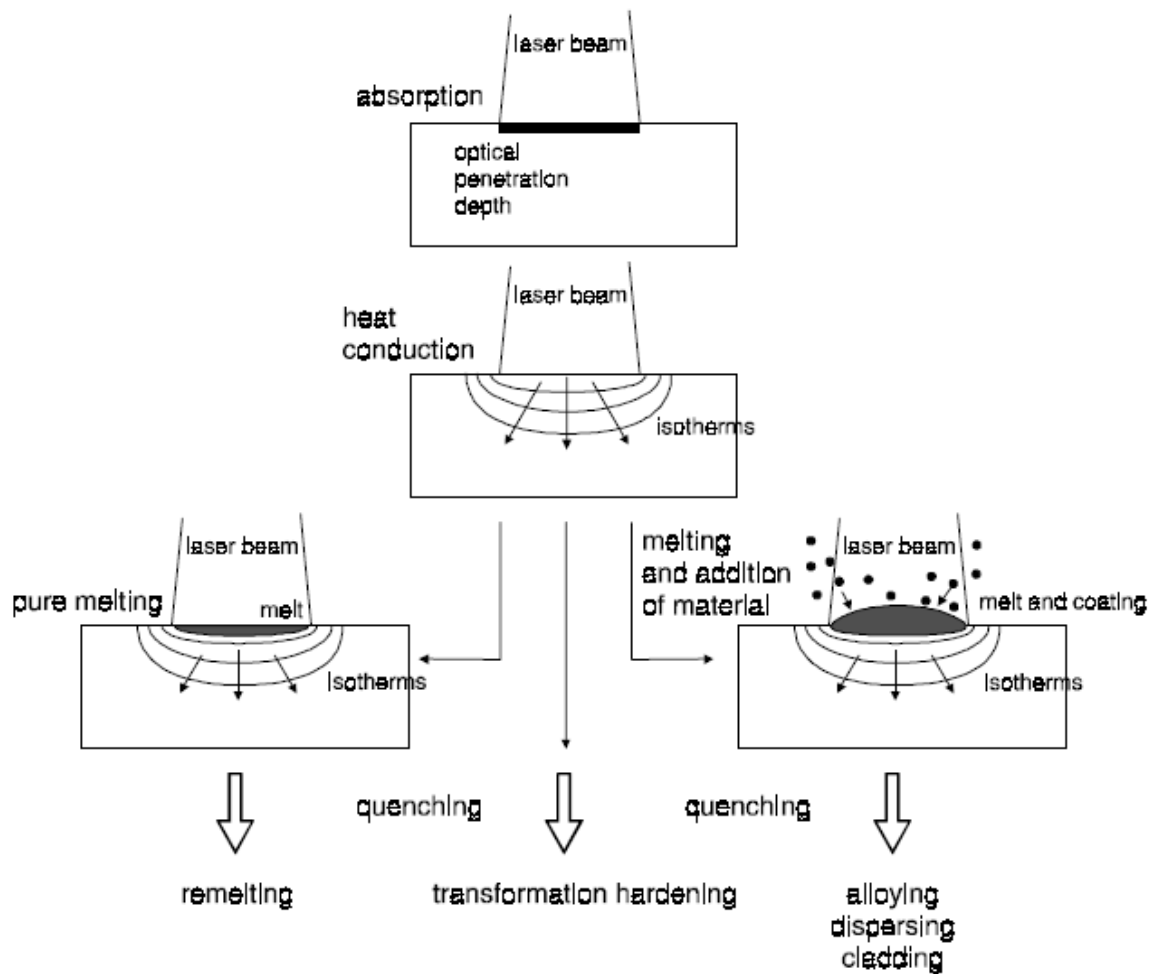


Fig.2. Los tratamientos láser se distinguen por la temperatura de la superficie y por la adición de material. (Stern 1990)

Existen tres técnicas de láser que pueden mejorar las propiedades superficiales por el cambio de la composición del material, se pueden distinguir: laser alloying, laser cladding y laser dispersing. El laser cladding será explicado con más detalle en el capítulo 5, en cambio el láser dispersing y laser alloying no se desarrollarán ya que no son objetivo del presente proyecto.

Estas técnicas se muestran esquemáticamente en la figura 3.

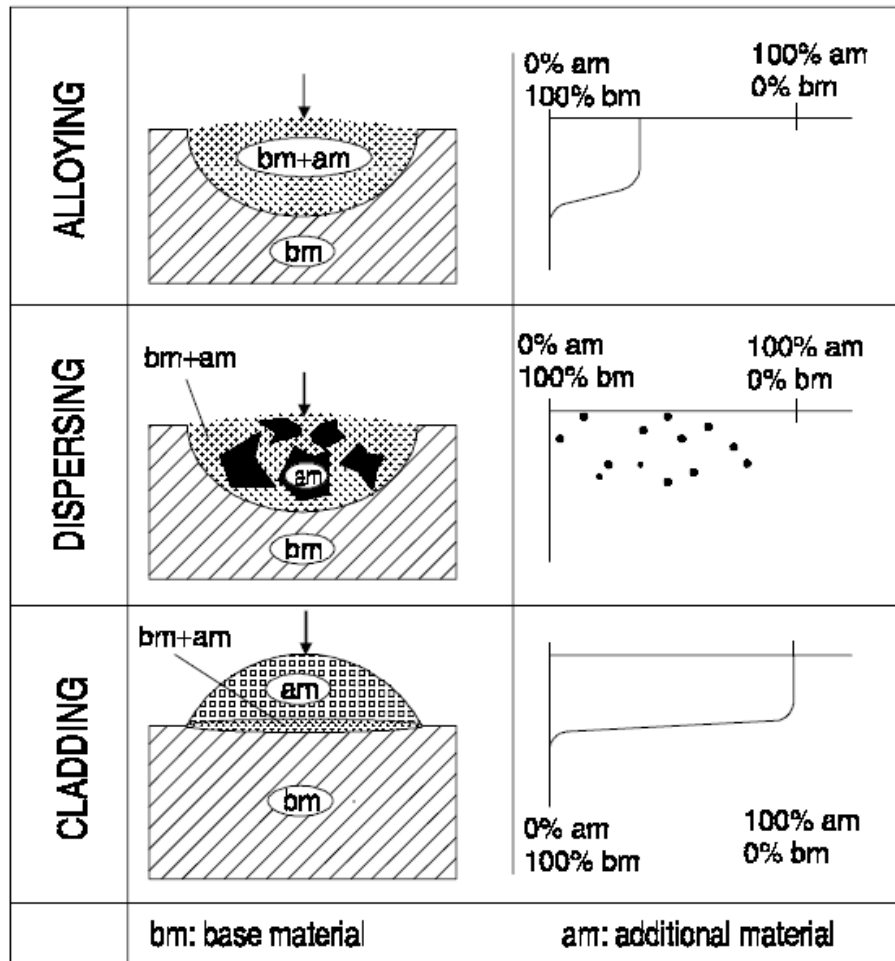


Fig.3. Comparación de una superficie tratada por laser alloying, laser dispersing y laser cladding (Smurov 1992).

Los tres métodos implican la formación de un baño de fusión al que se aplica el material de recubrimiento. Pero dependiendo del grado alcanzado de la mezcla entre el material añadido y el material base, se pueden distinguir el laser alloying y el laser dispersing por una parte, y el laser cladding por otra.

La primera clase se caracteriza por una mezcla completa de los elementos añadidos con el material base. Por el contrario, el laser cladding genera una capa de superficie que casi no contiene elementos del sustrato en la parte superior del material base. Por lo tanto, las propiedades de la capa de recubrimiento producida dependen en gran parte del material de aporte.

2.2 Los recubrimientos por láser frente a los métodos convencionales.

Como ya se ha explicado, el recubrimiento por láser es una de las técnicas que están en uso para mejorar las propiedades superficiales de muchos materiales. Pero existen otros métodos para mejorar superficialmente un material; ejemplos de otros métodos de recubrimiento son el plasma spray, la evaporación, la implantación iónica, etc. En todos estos métodos el recubrimiento que se aplica sobre el material base debe proporcionar las propiedades requeridas, tales como resistencia contra la corrosión o desgaste.

El material de recubrimiento puede ser predeposicionado sobre el sustrato o puede ser proporcionado durante el proceso. En todos los procesos se aplica una fuente de calor para fundir el material de recubrimiento y/o el material base, pero dependiendo de la técnica, se logra una unión por fusión o bien una unión adhesiva entre la capa superficial y el material base.

En general, el uso de un haz de láser en tratamientos de superficie ofrece varias ventajas con respecto a fuentes de calor convencionales (König 1989):

- El suministro de energía puede ser controlado fácilmente.
- Es posible hacer tratamiento muy localizado.
- La entrada total de calor es baja, por lo tanto la distorsión es mínima.
- Las velocidades de calentamiento y enfriamiento son altas, y como consecuencia resultan microestructuras finas y/o fases metaestables.
- El tratamiento es un proceso sin contacto. No hay desgaste de ninguna herramienta, ni actúan fuerzas mecánicas en la pieza de trabajo.
- La profundidad del proceso está bien definida.

Atamert et al (1989) describen algunas ventajas más del plaqueado láser respecto a las técnicas convencionales de recubrimiento: se consigue una dilución mínima del sustrato con el material de recubrimiento y, sin embargo, se consigue una fuerte unión por fusión entre ellos, lo cual es una característica única del recubrimiento por láser. Además la porosidad en el recubrimiento se puede prevenir por completo y se puede lograr una distribución homogénea del recubrimiento.

3. El titanio y sus características.

Es importante conocer las características mecánicas y químicas del titanio para entender por qué se utiliza en aplicaciones de ingeniería, y a su vez para explicar los problemas que presenta bajo condiciones extremas de oxidación, corrosión y desgaste a elevadas temperaturas. Así también se entenderá mejor la necesidad de desarrollar recubrimientos para mejorar sus características superficiales.

En este capítulo se dan a conocer las distintas aplicaciones de éste metal, y se explicarán sus propiedades tanto mecánicas como químicas, las cuales determinarán dichas aplicaciones. Además se desarrollarán las características que presentan las aleaciones del titanio según la microestructura que presentan a temperatura ambiente (aleaciones Ti α , aleaciones Ti súper α , aleaciones Ti $\alpha+\beta$, aleaciones Ti β).

Finalmente, una vez explicadas todas estas propiedades, se hará un breve resumen de aquellas que sean más importantes e influyentes en los tratamientos superficiales, los cuales se explicarán en los próximos capítulos.

El titanio es un material que se clasifica como un metal de transición. En estado puro es blanco y brillante, es muy resistente, ligero y tiene una densidad considerablemente baja, siendo excelente en la resistencia frente a la corrosión.

Es tan fuerte como el acero y un 60 por ciento más pesado que el aluminio, sin embargo, es el doble de fuerte. Además es un elemento dúctil únicamente cuando está libre en el oxígeno, fisiológicamente se lo considera inerte y además, es dimórfico.

El titanio es tan resistente que puede soportar el ácido sulfúrico diluido, el ácido clorhídrico, la mayoría de los ácidos orgánicos, las soluciones de gas y el cloruro de cloro, lo cual lo convierte en un material realmente único. Además debido a su gran fuerza, resistencia y ligereza, es especialmente eficaz para las aleaciones de aluminio, molibdeno, manganeso, hierro y muchos otros metales.

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. También es un material muy resistente al agua, especialmente al agua del mar, razón por la cual también se usa en los ejes de las hélices, los aparejos y muchas otras partes de los barcos constantemente expuestos al agua salada, asimismo, este metal tiene propiedades biocompatibles, dado que los tejidos del organismo toleran su presencia, por lo que es factible la fabricación de muchas prótesis e implantes de este metal.

Otros datos de interés:

- Número atómico: 22
- Peso atómico: 47,867
- Símbolo atómico: Ti
- Punto de fusión: 1668° C
- Punto de ebullición: 3287° C

(<http://www.ojocientifico.com/4488/caracteristicas-del-titanio>, consulta realizada en Abril 2014)

También es importante tener en cuenta las propiedades físicas mostradas en la siguiente tabla:

Estructura cristalina	α (HCP) a $T < 882^\circ\text{C}$ β (BCC) a $T > 882^\circ\text{C}$
Densidad	fase α (20°C): $4,51 \text{ g cm}^{-3}$ fase β (885°C): $4,35 \text{ g cm}^{-3}$
Capacidad calorífica	$523 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$
Conductividad térmica	$17 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
Coefic. Expansión térmica (20°C)	$8,41 \times 10^{-6} /^\circ\text{C}$
Conductividad eléctrica (relativa al Cu)	0,031

Tabla 1. (Tarín 1999)

Después de conocer sus propiedades físicas se pueden ahora entender sus características mecánicas y químicas que hacen al titanio un metal único. Dichas características están resumidas en las siguientes tablas:

Características mecánicas
<ul style="list-style-type: none"> -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. -Mantiene una alta memoria de su forma.

Tabla 2.

Características químicas

- 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 882 °C presenta estructura cúbica 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 (H₂SO₄) 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.
- Sus iones no tienen existencia a pH básicos.

Tabla 3.

Las propiedades mecánicas del titanio dependen fundamentalmente de su pureza. Así, el titanio comercialmente puro posee reducida resistencia, aunque ésta puede incrementarse con la adición de aleantes, a costa de reducir su plasticidad. A esta aptitud debe sumarse la posibilidad de realizar tratamientos térmicos con transformación total o parcial y su endurecimiento por acritud (ASM Handbook N2).

No obstante, el titanio es un metal caro, pues reacciona muy rápidamente con el oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, hierro y carbono, lo que dificulta su extracción y procesado. Dado que a elevadas temperaturas dicha reactividad aumenta exponencialmente, se requieren técnicas de vacío para su procesado, pues contenidos muy reducidos de elementos de aleación, especialmente los intersticiales, modifican en gran medida sus propiedades (ASM Handbook N.2).

Además de la reactividad con los elementos presentes en la atmósfera del horno, cabría destacar la interacción con los diferentes materiales empleados como molde (gres, alúmina, itria y circonita en la presente investigación), determinada fundamentalmente por la variación de la energía libre de Gibbs de los respectivos óxidos. Cuanto más negativo este valor, mayor la estabilidad del óxido formado.

En relación a sus características, cabe señalar que el titanio es el único metal ligero que presenta dimorfismo, ya que en estado puro su estructura hexagonal compacta (HC, fase α) presenta una transformación alotrópica a 882°C, pasando a una microestructura cúbica centrada en el cuerpo (CC, fase β) (ASM Handbook N2).

En la figura 4 se muestran las dos posibles estructuras del titanio:

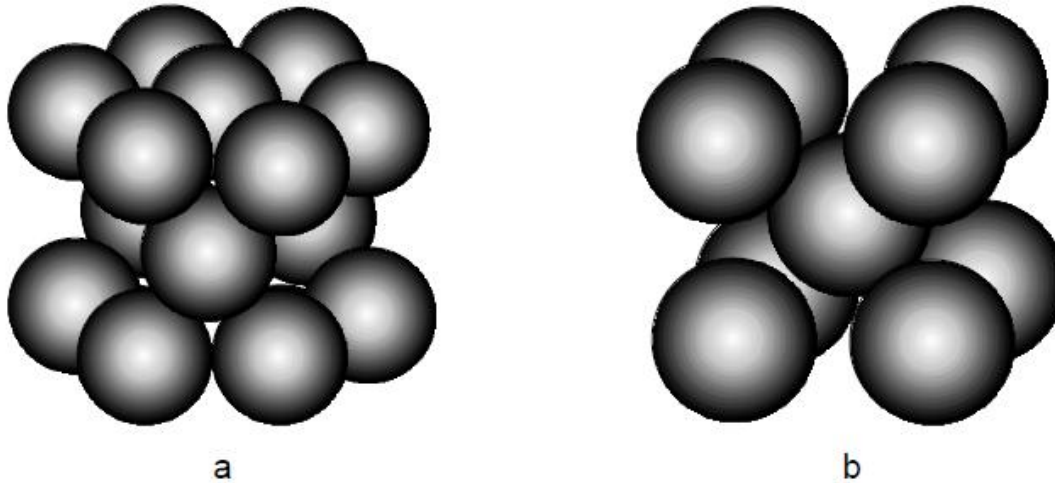


Fig.4. a) Estructura α -HC. b) Estructura β -CC. (ASM Handbook N2)

Así, las aleaciones de titanio se pueden clasificar en 4 grupos fundamentales en función de la microestructura que presentan a temperatura ambiente: TiCP, aleaciones tipo α , aleaciones tipo β y aleaciones $\alpha + \beta$ (ASM Handbook N2).

En equilibrio, la estructura beta es inestable a temperaturas inferiores a 882°C, descomponiéndose de nuevo en fase α al enfriar por debajo de la temperatura de transición. Si los elementos aleantes presentan una red cristalina hexagonal (isomorfa del titanio α), ensancharán la región α , incrementando la temperatura a la cual la fase α es estable, figura 5. Entre ellos se encuentran el oxígeno, carbono, aluminio y nitrógeno.

Si, por el contrario los elementos estabilizan la fase β permiten que sea estable a temperaturas menores de la temperatura de β -transus, figura 6.

Destacan como aleantes β el vanadio, cromo, hierro, molibdeno y tántalo.

Otro grupo de aleantes que estabilizan la fase β son los que forman sistemas eutectoides con el titanio, reduciendo la temperatura a la que se produce la transformación eutectoide y produciendo, por tanto, estructura bifásica a temperatura ambiente, figura 7. Entre estos aleantes destacan el hierro, el manganeso, el cromo, el cobalto, el níquel, el cobre y el silicio (Tarín 1999).

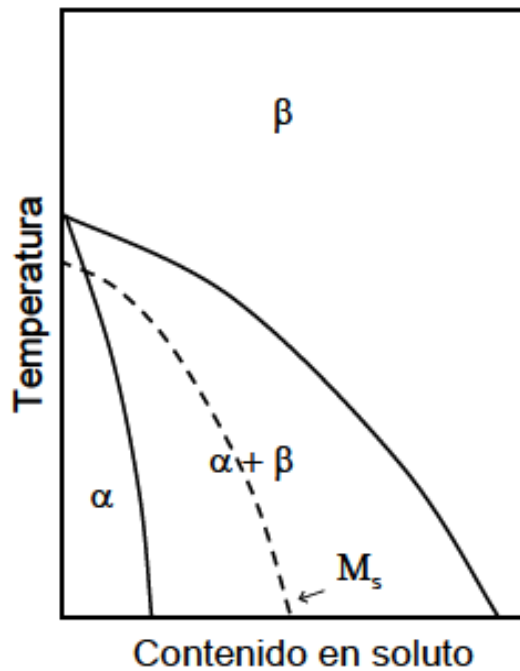


Fig. 5. Diagrama de equilibrio del titanio con un elemento α -estabilizante (Reig 2005, Amigó 2003).

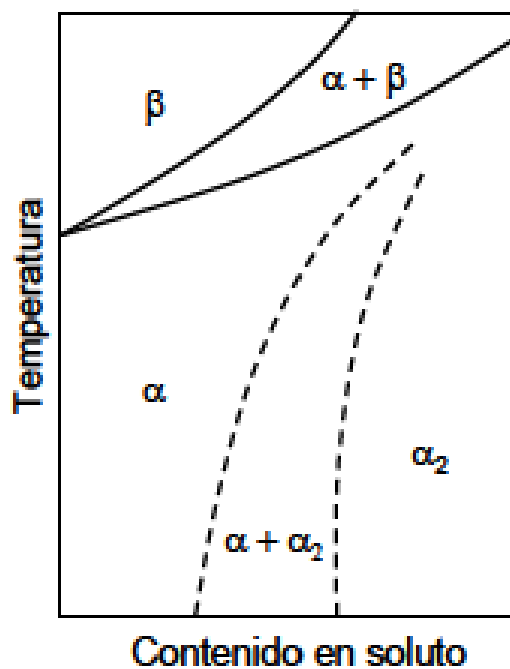


Fig. 6. Diagrama de equilibrio del titanio con un elemento β -estabilizante (Reig 2005, Amigó 2003).

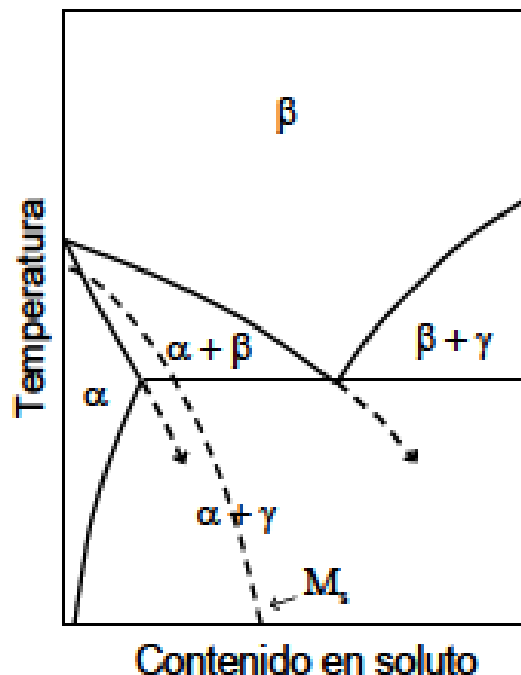


Fig. 7. Diagrama de equilibrio del titanio con un elemento β -eutectoide. (Reig 2005, Amigó 2003).

La existencia de estas dos variedades alotrópicas da lugar a la posibilidad de modificar las propiedades del titanio mediante un tratamiento térmico y especialmente en sus aleaciones, ya que se puede retener totalmente o parcialmente la forma β . Además como la solubilidad de otros metales puede ser diferente en las dos variedades, se amplía el margen de posibilidades en cuanto a los tratamientos térmicos de las aleaciones (Leyens 2003, Tarín 1999).

El titanio puro comercial presenta una resistencia superior a la del titanio de elevada pureza (99%), por eso tanto el Ti como sus aleaciones pueden competir favorablemente con las aleaciones de Al para algunas aplicaciones aeroespaciales a pesar de su mayor precio

No obstante, el titanio va perdiendo resistencia a temperaturas elevadas, a pesar de su elevada resistencia a la corrosión. En la figura 8 se puede observar dicha evolución de la resistencia con la temperatura.

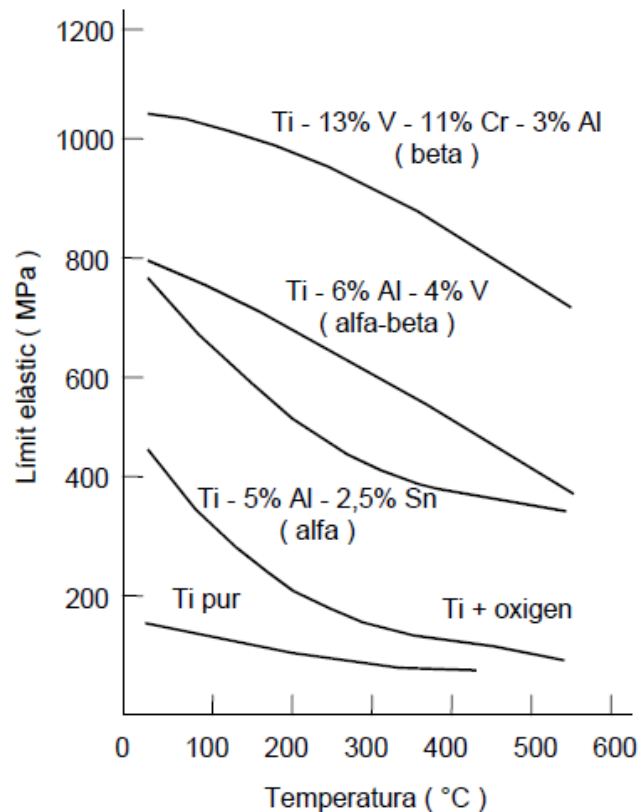


Fig. 8. (Aliatges metàl·lics 2003)

Por consiguiente, para mejorar las características mecánicas se plantea la adición de aleantes, que modifica la temperatura de transformación alotrópica del titanio, pudiéndose dividir las aleaciones en cuatro grupos diferentes:

- Aleaciones Ti α
- Aleaciones Ti súper α
- Aleaciones Ti $\alpha+\beta$
- Aleaciones Ti β

La adición de estaño produce un endurecimiento por solución sólida sin afectar apreciablemente a la temperatura de transformación.

El aluminio, oxígeno, hidrógeno y otros elementos estabilizan la fase α e incrementan la temperatura a la cual α se transforma en β . En cambio elementos como el vanadio, molibdeno, tántalo, niobio estabilizan la fase β . Finalmente el manganeso, cromo y hierro, presentan diagramas con transformación eutéctica a temperatura ambiente.

Por eso el titanio y sus aleaciones se clasifican en los cuatro grupos citados anteriormente, cuyas características mecánicas se presentan en la siguiente tabla.

Material	Resistencia a tracción (MPa)	Límite Elástico (MPa)	Alargamiento %
Titanio puro comercial			
99,5% Ti	241	172	24
99,0% Ti	552	483	15
Aleaciones Ti α 5% Al, 2,5% Sn	862	779	15
Aleaciones Ti β 13% V, 11% Cr, 3% Al	1290	1214	5
Aleaciones Ti casi α 8% Al, 1% Mo, 1% V	966	828	14
6% Al, 4% Zr, 2% Sn, 2% Mo,	1007	993	3
Aleaciones Ti $\alpha + \beta$ 8% Mn	966	862	15
6% Al, 4% V	1034	966	8
7% Al, 4% Mo	1172	1034	10
6% Al, 6% V, 2% Sn	1103	1034	12

Tabla 4. Propiedades de algunas aleaciones de titanio (www.upv.es, consulta realizada en Abril 2014)

A continuación se explican más detalladamente las características de cada tipo de aleación:

Aleaciones de Ti α

Si bien el oxígeno, nitrógeno y carbono, impurezas habituales del titanio comercial, estabilizan mediante solución sólida la fase α , la tendencia es producir titanio puro como sea posible, y conseguir las características mecánicas deseadas añadiendo los aleantes idóneos. El aluminio es el elemento de mayor importancia comercial que da lugar a soluciones sólidas por sustitución y eleva la temperatura de la transformación α - β con una estabilización muy amplia de la fase α .

Estas aleaciones son más ligeras y con mayor índice de resistencia/peso que el titanio puro. Si además se añade estaño a las aleaciones de aluminio aumentan aún más las características resistentes, y sin pérdida de ductilidad.

Otros elementos que también pueden mejorar las características del titanio con aluminio son el circonio, niobio y molibdeno. Estas aleaciones contienen normalmente un 5% de aluminio y un 2.5% de estaño, ambos son estabilizadores de la fase α y endurecedores por solución sólida.

Además tienen una resistencia a la corrosión y a la oxidación bastante elevada, mantienen su resistencia a elevadas temperaturas, y normalmente poseen aceptable ductilidad y conformabilidad a pesar de su estructura hexagonal.

Las aleaciones α se tratan a elevadas temperaturas en la zona β , y se enfrían posteriormente. Si el enfriamiento es rápido da lugar a una estructura α de grano acicular fi, mientras que un enfriamiento lento, en horno, proporciona una estructura de placas tipo Widmanstatten (ver figuras 9 y 10).

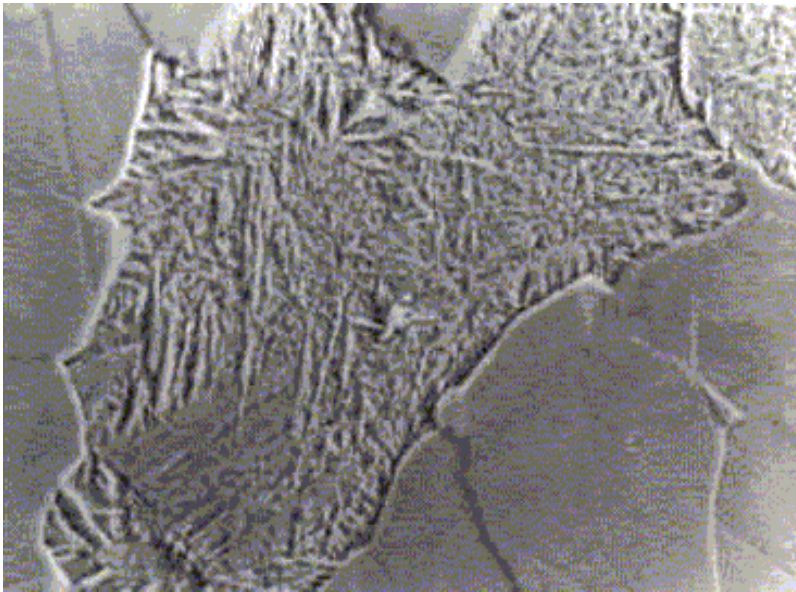


Fig. 9. Estructura α de grano acicular (www.upv.es, Mayo 2014).

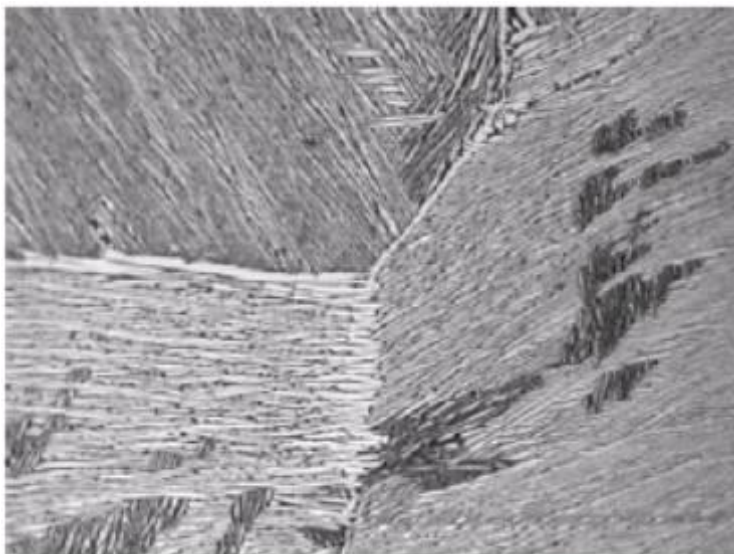


Fig. 10. Placas tipo Widmanstatten. (Figura obtenida en la página http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13_4.html, Abril 2014)

Aleaciones de Ti β

A pesar de que elevadas adiciones de vanadio o molibdeno produzcan una estructura completamente β a temperatura ambiente, ninguna de las aleaciones beta están aleadas hasta este extremo. Sino que se combinan los estabilizadores, β , de manera que el enfriamiento rápido produce una estructura β metaestable.

Estas aleaciones, por tanto, pueden ser tratadas térmicamente, y responden a procesos de endurecimiento por precipitación con los que se consigue aumentar la resistencia.

Su principal aplicación es en elementos estructurales para uso aeroespacial.

Aleaciones de Ti $\alpha+\beta$

Las aleaciones $\alpha + \beta$ pueden tratarse térmicamente para obtener otras resistencias.

La aleación solubiliza cerca de la temperatura de transformación en fase β , cosa que permite que aún quede cierta cantidad de fase α para evitar el crecimiento de grano. Después, la aleación se enfría rápidamente para formar una solución sólida sobresaturada metaestable β' o martensita de titanio α' . Y posteriormente, la aleación es envejecida o revenida a una temperatura de 500°C. Durante el envejecimiento, las fases α y β anteriores al enfriamiento, y los precipitados de las fases α' o β' , aumentan considerablemente la resistencia de la aleación.

Normalmente, la martensita de titanio se forma en las aleaciones $\alpha + \beta$ con menor contenido en aleantes, mientras que la fase β sobresaturada se forma con mayor facilidad cuando el contenido en aleantes se aproxima a la composición de la fase β estable.

La martensita de titanio tiene aspecto típico acicular (ver fig.6). Y durante el envejecimiento, la fase α precipita en una estructura Widmanstaetten (ver fig.7) que mejora las propiedades resistentes y mantiene la tenacidad elevada.

Los componentes para estructuras aeroespaciales, motores de reacción y trenes de aterrizaje son algunas de las aplicaciones típicas de las aleaciones $\alpha + \beta$ tratadas térmicamente.

La aleación más utilizada en la industria es la Ti6Al4V, empleada tanto en aeronáutica como en prótesis médicas, ya que combina elevadas resistencias mecánicas y a corrosión, junto con propiedades de superelasticidad a deformaciones lentas y posibilidad de soldadura por difusión que amplía sus aplicaciones.

En la siguiente tabla se resumen de las características de cada aleación:

Aleación		Características	Aleaciones más comunes
Aleaciones α		Microestructura de fase α . Buena resistencia a la fluencia a temperaturas moderadamente elevadas. No se le aplican tratamientos térmicos.	Ti cp99,2Ti-0,2PdTi-0,3Mo-0,8Ni
Aleaciones α/β	Casi α	Estructura esencialmente α . Mejoran sus propiedades mecánicas con tratamientos térmicos de envejecimiento o maduración.	Ti-8Al-1Mo-1VTi-6Al-2Sn-4Zr-2Mo
	Casi β	Tienen una estructura esencialmente β .	Ti-6Al-4VTi-3Al-2.5VTi-6Al-2Sn-4Zr-6MoTi-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4MoTi-10V-2Fe-3Al
Aleaciones β		Altos contenidos de estabilizantes de la fase β , pero su microestructura no es completamente monofásica. Buenas propiedades para el conformado por deformación plástica. Se pueden incrementar sus propiedades mecánicas con tratamientos térmicos de maduración con bajas temperaturas y altos tiempos.	Ti-13V-11Cr-3AlTi-3Al-8V-6Cr-4Mo-4ZrTi-8Mo-8V-2Fe-3AlTi-11.5Mo-6Zr-4.5Sn

Tabla 5.

Después de conocer las características del titanio y entender los motivos por los que este material es tan utilizado en aplicaciones de ingeniería, se pueden explicar en el siguiente capítulo cuales son los problemas de este material, y más adelante plantear las posibles soluciones.

Antes de pasar al siguiente capítulo en el cual se describe el problema del Titanio más detalladamente, se van a resumir las propiedades ahora descritas que van a influir más en los tratamientos térmicos.

Estas propiedades son:

- El titanio es un material capaz de soportar condiciones extremas de frío y calor.
- Es resistente al ataque de muchos ácidos.
- Presenta propiedades biocompatibles, dado que los tejidos del organismo toleran su presencia.
- Es el único metal ligero que presenta dimorfismo, a temperatura ambiente tiene estructura hexagonal compacta (hcp) llamada fase alfa. Por encima de 882 °C presenta estructura cúbica centrada en el cuerpo (bcc) se conoce como fase beta.
- Presenta alta resistencia a la corrosión, la cual es debida al fenómeno de pasivación que sufre (se forma un óxido que lo recubre).
- Es un metal caro, ya que reacciona muy rápido con el oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, etc. Además esta reactividad aumenta con la temperatura, por lo tanto se requieren técnicas de vacío para su procesado.

4. Problema del Titanio.

Como se ha explicado anteriormente, el titanio y sus aleaciones se utilizan cada vez más en el sector aeronáutico, marino, en las industrias químicas y dispositivos biomédicos debido a sus propiedades como la alta resistencia mecánica, a la corrosión, a la oxidación, y buena biocompatibilidad. Sin embargo, debido a sus pobres propiedades tribológicas, las aplicaciones del titanio y sus aleaciones bajo severas condiciones de desgaste y fricción están muy restringidas.

Además con el rápido desarrollo de la industria y de la tecnología, los componentes hechos de titanio y sus aleaciones suelen utilizarse en ambientes a altas temperaturas. Sin embargo, debido a su alta temperatura de oxidación y su pobre resistencia al desgaste, tienen limitada su aplicación.

Por otra parte, en aplicaciones de biomedicina las aleaciones de titanio (como el Ti-6Al-4V) pueden liberar iones de aluminio durante un largo período de trabajo en el cuerpo humano. Mientras, los iones de aluminio con fuerte neurotoxicidad tienden a acumularse tanto en neuronas y astrocitos y hacer daño al cuerpo humano.

Con el fin de resolver estos problemas mencionados, numerosas técnicas de tratamiento de superficies se han estudiado para mejorar las propiedades de la superficie de titanio y sus aleaciones, tales como nitruración, carburación, oxidación, deposición física de vapor (PVD), deposición de vapor químico (CVD), e implantación de iones. Además, los rayos láser son ampliamente utilizados en la modificación de superficie de diferentes metales, debido a su alta coherencia, la direccionalidad y la alta densidad de energía.

En concreto, hay tres propiedades del titanio en las que los investigadores están centrando su atención:

- Mejora de la biocompatibilidad.
- Mejora de la resistencia mecánica y/o a la oxidación a elevada temperatura.
- Mejora de la resistencia al desgaste.

Estas tres propiedades en las que se ha centrado especial atención están explicadas más adelante en el capítulo 6.

Una vez ha quedado claro cuáles son los problemas del titanio y en que propiedades se va a prestar más atención para mejorar las aplicaciones de dicho material, se pueden ya describir en el siguiente capítulo varios tratamientos superficiales para mejorar estas tres propiedades.

5. Tratamientos Superficiales.

Hay muchos tratamientos que se pueden realizar para mejorar las características superficiales del titanio, los que se van a explicar en éste capítulo son la implantación iónica, la proyección térmica (en concreto se hablará del plasma spray), la evaporación y las técnicas láser (en concreto el laser cladding).

Además de explicar en qué consiste cada técnica también se mencionarán las ventajas y desventajas de cada tratamiento para poder así compararlos. Y saber de éste forma que tratamientos son más viables dependiendo de las aplicaciones requeridas.

De esta forma, antes de acabar el capítulo, se presentará una tabla comparativa de las ventajas y desventajas de los procesos explicados.

5.1 Implantación iónica.

La implantación iónica consiste en la aceleración y proyección de iones contra una superficie. Gracias a la energía cinética del ion, éste penetra en la red cristalina produciendo una alteración superficial en el comportamiento mecánico y químico, así como también en las propiedades eléctricas y magnéticas.

Desde el punto de vista químico, las superficies modificadas pueden desarrollar una serie de mecanismos protectores, por modificación en las propiedades de adherencia de los óxidos formados o por formación de capas pasivas, que prolongan la vida en servicio de los materiales metálicos tanto frente a la corrosión electroquímica como a la originada por altas temperaturas.

Al ser un tratamiento especial, tiene sus nichos de aplicación concretos, en el utillaje y herramientas que trabajando en frío (por debajo de 500°C) existe una problemática de adhesión, abrasión y corrosión del material trabajado. Un ejemplo son las boquillas de inyección y postizos de moldes en la Industria Transformadora del Plástico.

El fundamento de la implantación iónica es el bombardeo iónico, de hecho un creciente número de tratamientos avanzados están basados en el bombardeo iónico. Los iones no son otra cosa que átomos cargados eléctricamente, normalmente mediante el arranque de uno de sus electrones. Esto es necesario para poder acelerarlos y localizarlos mediante campos eléctricos y magnéticos.

Dependiendo de la energía con la que estos átomos llegan a una superficie se pueden dar tres procesos diferentes: Si la energía es muy baja (10 Voltios de aceleración) los átomos se depositan en superficie, creándose un recubrimiento, en cambio si la aceleración es mayor (500 Voltios) predomina un proceso de pulverización de la superficie conocido como Sputtering. Puede ser útil para limpieza superficial o para evaporar materiales para recubrimientos. Finalmente, a energías mucho mayores (100.000 Voltios), los átomos penetran dentro de la superficie incrustándose a una profundidad de muchas capas atómicas (Figura 11). Por ejemplo, los iones de Nitrógeno acelerados con 100.000 Voltios se mueven en el vacío a una velocidad de 1.170 km/s y al chocar contra una superficie de acero se incrustan alcanzando profundidades de hasta 0,2 micras. Este es el proceso conocido como implantación iónica.

(<http://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/123/1/TESIS45-100111.pdf?q=implantaci>, Junio 2014)

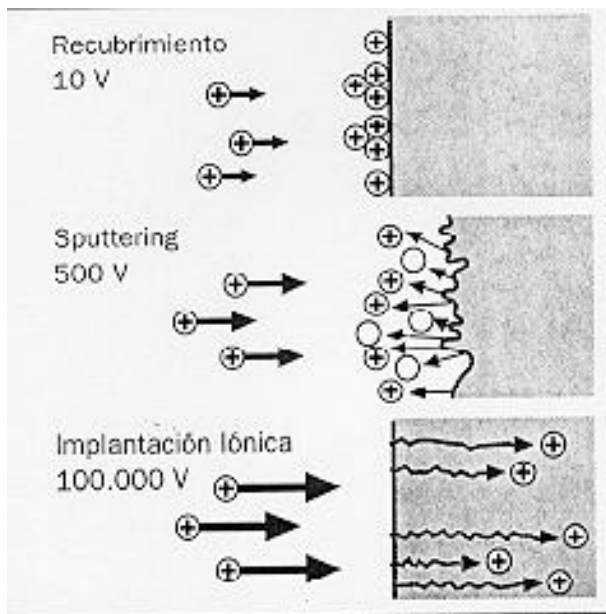


Fig. 11. Efectos del bombardeo iónico dependiendo de la energía. (Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos, 2000).

Por tanto el proceso de **implantación iónica** consiste en la creación del haz de iones, su aceleración hasta la energía prevista (normalmente 100 - 200 keV), su purificación y focalización, mediante electroimanes, y su impacto en las zonas de la superficie que se desean proteger.

La implantación iónica produce en las superficies cambios de composición y estructura que son el origen de su aumento de resistencia al desgaste, fricción y corrosión.

Los iones implantados se distribuyen en una profundidad que oscila entre 200 y 2000 capas atómicas ($0.05\mu\text{m}$ a $0.5\mu\text{m}$) dependiendo del tipo de ion, del material base y de la energía del bombardeo. El máximo de concentración, que para los iones ligeros como Carbono o Nitrógeno puede superar el 50%, se sitúa a una cierta profundidad y luego disminuye suavemente. No hay pues una intercara abrupta entre la zona implantada y el material base (Figura 12). En cuanto a la profundidad, muy reducida si se la compara con la de tratamientos convencionales, hay que decir que es la adecuada para producir los cambios que se desean producir. No interesa profundizar más.

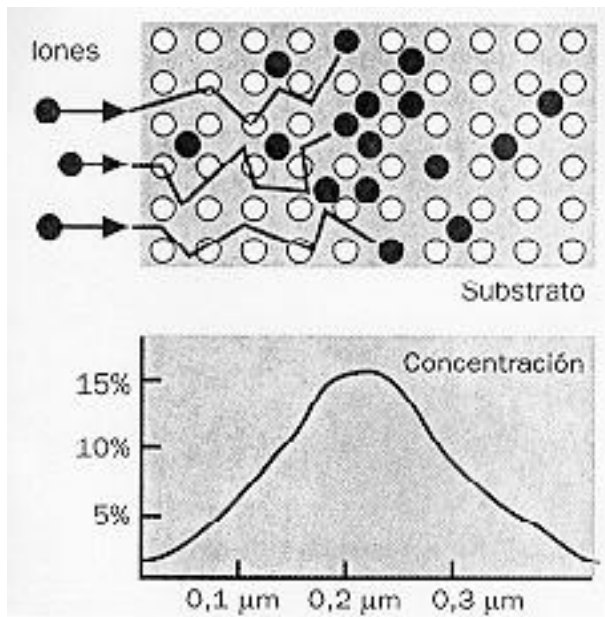


Fig. 12. Variación de la concentración en la implantación iónica. (Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos, 2000).

Las superficies implantadas con iones tipo Boro, Carbono, Nitrógeno etc. se endurecen como consecuencia de la formación de finos precipitados (Nitruros, etc.). También la introducción de dosis elevadas de estos elementos crea esfuerzos compresivos importantes que contribuyen al bloqueo de microgrietas y al cierre de los canales de corrosión.

La capa de óxido superficial presente en muchos metales puede cohesionarse contribuyendo también a una mejor protección contra la corrosión y a una reducción de los coeficientes de fricción.

Por su parte la implantación de iones metálicos tiene efectos muy diversos: Por ejemplo el Titanio, en combinación con el Carbono, produce una drástica reducción del coeficiente de fricción cosa que también la logra el Molibdeno en combinación con el Azufre. La implantación de Cromo consigue formar capas de óxido muy coherentes que protegen las superficies contra corrosión y desgaste.

En resumen: siendo tres los parámetros que caracterizan cada implantación (tipo de ion, energía de implantación y dosis implantada) hay distintas recetas para los distintos problemas, aunque en el caso de los aceros, que es el material más tratado, las implantaciones de Nitrógeno, seguidas de las de Cromo, Carbono o Titanio constituyen el 90% de las soluciones empleadas. (ASM HANDBOOK, VOL.5)

A continuación se valorarán los efectos de la implantación iónica de una superficie, teniendo en cuenta los efectos balísticos y los efectos químicos y estructurales.

Efectos balísticos:

A grandes rasgos, la penetración media de un ion dentro de un sólido dependerá de la densidad de éste, de la energía del proyectil y de las masas atómicas del blanco y del proyectil. A las energías típicas de la implantación iónica (<200 keV) ni siquiera la implantación de Hidrógeno en materiales ligeros como el Silicio supera las 2 micras.

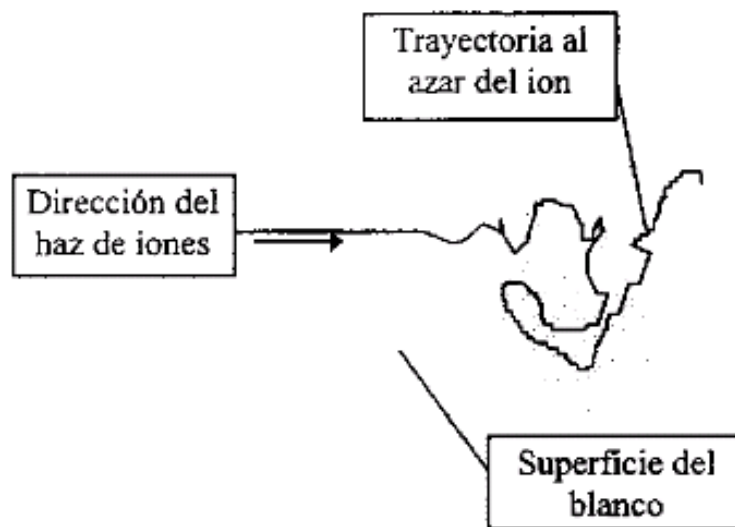


Fig. 13. Trayectoria al azar de un ión implantado. (Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos, 2000).

El proceso de frenado es aleatorio. Así pues, los átomos implantados se distribuirán en profundidad siguiendo algún tipo de distribución estadística que se puede aproximar a una gaussiana (Figura 14). A dosis bajas, apenas habrá átomos en superficie, mientras que habrá un pico de concentración a una determinada profundidad y a partir de ahí decrecerá hasta extinguirse.

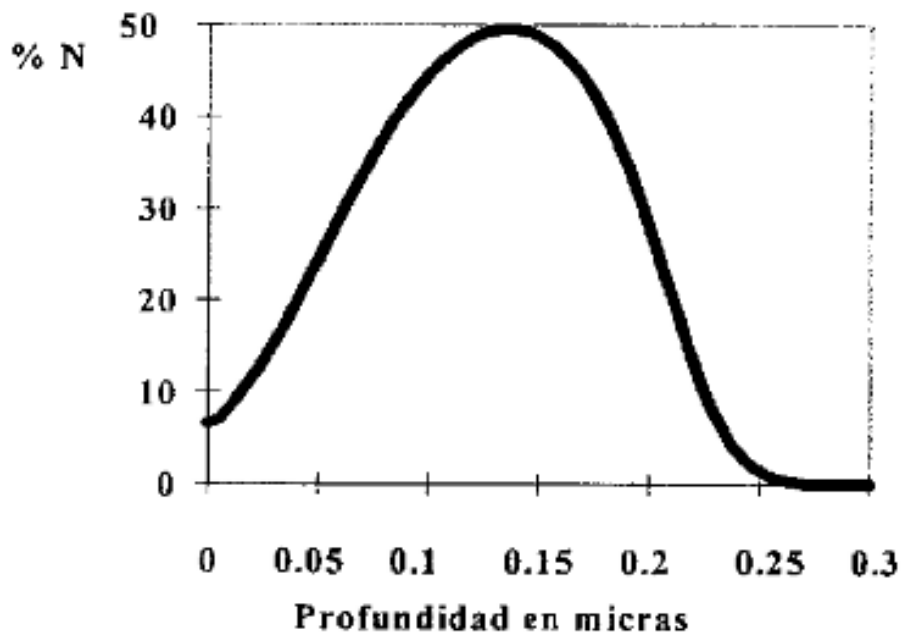


Fig. 14. Perfil de implantación de Nitrógeno en un acero (www.rabfis15.uco.es, Junio 2014)

La implantación de iones produce también un efecto de sputtering de la superficie que es más importante cuanto mayor es la masa del proyectil. Si a medida que se implantan los iones se va arrancando material de la superficie, es posible llegar a una situación de saturación en la que el pico de implantación se sitúa en superficie y a partir de ahí no puede aumentarse la dosis retenida. Para iones pesados la dosis de saturación puede ser muy baja.

Los efectos balísticos de la implantación iónica en el seno de los sólidos son muy variados: creación de vacantes y de intersticiales, ionización de los átomos de la red, etc. En general, y con mayor importancia para iones pesados, el ion incidente comunica gran parte de su energía a átomos de la red, desplazándolos a gran velocidad e iniciando cascadas de iones secundarios.

Efectos químicos y estructurales:

La implantación produce en primer lugar efectos químicos en el sentido de cambios de composición y formación de nuevas aleaciones o compuestos. En este sentido la implantación iónica crea nuevos materiales en la superficie de partida. Al ser un proceso fuera del equilibrio es posible crear aleaciones metaestables, por encima de los límites de solubilidad. También, en el caso de la implantación de elementos reactivos como B, C, O etc. se produce la formación de Boruros, Carburos, Nitruros, Óxidos etc., normalmente en forma de precipitados finos y dispersos, que tienen bastante que ver con los cambios de dureza superficial observados.

Pero además de los efectos químicos están también los efectos estructurales, como la amortización de las capas superficiales, la formación de precipitados endurecedores o la creación de tensiones compresivas que aumentan la elasticidad superficial y bloquean el crecimiento de las microgrietas, con lo que trabajan mejor a fatiga.

Finalmente, después de analizar sus efectos químicos, estructurales y balísticos se puede concluir que las ventajas e inconvenientes de éste tratamiento son:

Ventajas:

- Endurecimiento de la superficie del material, que se hace muy resistente al desgaste, particularmente al desgaste por adherencia.
- Reducción de la fricción, lo que reduce el agarrotamiento.
- Aumento del límite de fatiga de hasta en un 30%.
- Tratamiento superficial sin aumento de temperatura (metalurgia en frío).
- Sin distorsión geométrica.
- Preservación del estado de la superficie (por ejemplo, el súper acabado) y sus características mecánicas (por ejemplo, de acero revenido a baja temperatura).
- Sin pelado (no es un recubrimiento).
- Resistencia a la corrosión significativamente mejorada.

Inconvenientes:

- Zona de modificación superficial poco profunda. No adecuada para desgaste abrasivo severo.
- Elevado coste.
- Proceso direccional.
- No adecuada para herramientas que trabajan a alta temperatura (>300°C).

Y sus aplicaciones:

- Dispositivos médicos: anillos
- Prótesis médicas: cartílago artificial
- Prótesis médicas: rodillas, hombros, dedos, implantes dentales

- Piezas mecánicas: anillos, piezas de fricción
- Polímeros: siliconas, polietileno, etc.
- Metales: aleaciones de titanio, aleaciones de aluminio, aceros, metales preciosos como el oro, etc.

(ASM HANDBOOK, VOL.5)

5.2 Proyección térmica.

La proyección térmica es un procedimiento que consiste en fundir un metal en un crisol y proyectarlo atomizado, mediante un gas comprimido, sobre la superficie a recargar en la que se solidifica. Para ello se ha utilizado durante muchos años un tipo de pistola alimentada por un alambre, que atravesando una llama originada por un gas combustible y otro comburente, era fundido y proyectado sobre el material a recargar, por una corriente de aire comprimido. Actualmente, los procedimientos más utilizados son:

- Flame power (proyección de polvo por combustión).
- Flame wire (proyección de alambre por combustión).
- Wire arc (proyección de alambre por arco eléctrico).
- Plasma spray (proyección por plasma). Ésta técnica se explicará con más detalle a continuación.
- Detonación.
- HVOF (alta velocidad).

Se puede definir entonces la proyección térmica como la aportación de materiales proyectados en forma de partículas fundidas finamente divididas, sobre un sustrato debidamente preparado (www.wikipedia.org, Junio 2014).

El material a proyectar (en forma de polvo o varilla), es fundido mediante una energía obtenida a partir de la combustión de gases, de un arco voltaico o de una recombinación de gases plasmógenos, según el procedimiento empleado.

El material fundido es proyectado seguidamente sobre la pieza a recubrir en estado plástico con una alta energía cinética y térmica, que ceden a la misma (Figura 15), provocando la unión con una fuerza que va a depender del procedimiento empleado, de los parámetros utilizados, del material de aportación, del material del sustrato así como de la preparación del mismo y de su temperatura antes, durante y después de la proyección.

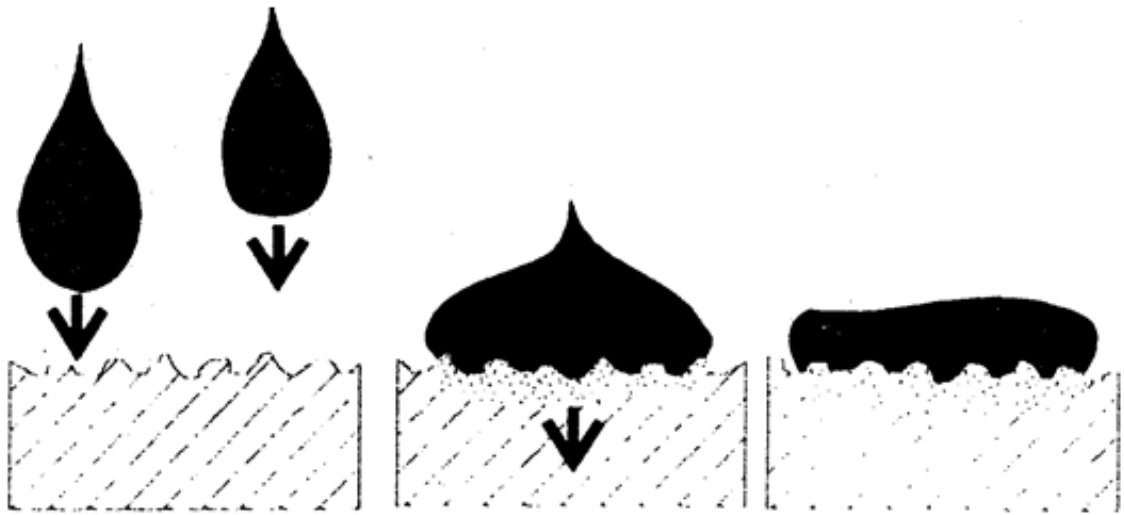


Fig.15. Formación de la capa (Vardelle y otros, 1986).

Cabe destacar que durante el proceso de proyección térmica, el material a recubrir no debe superar los 150°C para evitar los cambios estructurales o tensiones añadidas, lo cual implica que la proyección térmica puede ser considerada como un "recargue en frío", con excepciones tales como el sinterizado.

Siendo de entre los recubrimientos de proyección térmica, el de proyección por plasma uno de los más empleados. Por tanto se realizará una descripción más detallada de dicho proceso.

La proyección por plasma puede ser empleada con una amplia variedad de materiales, incluidos los cerámicos, y con un elevado rendimiento. Su empleo disminuye el riesgo de degradación del recubrimiento y del sustrato, en comparación con otros procesos a altas temperaturas. (Mordike y otros, 1986).

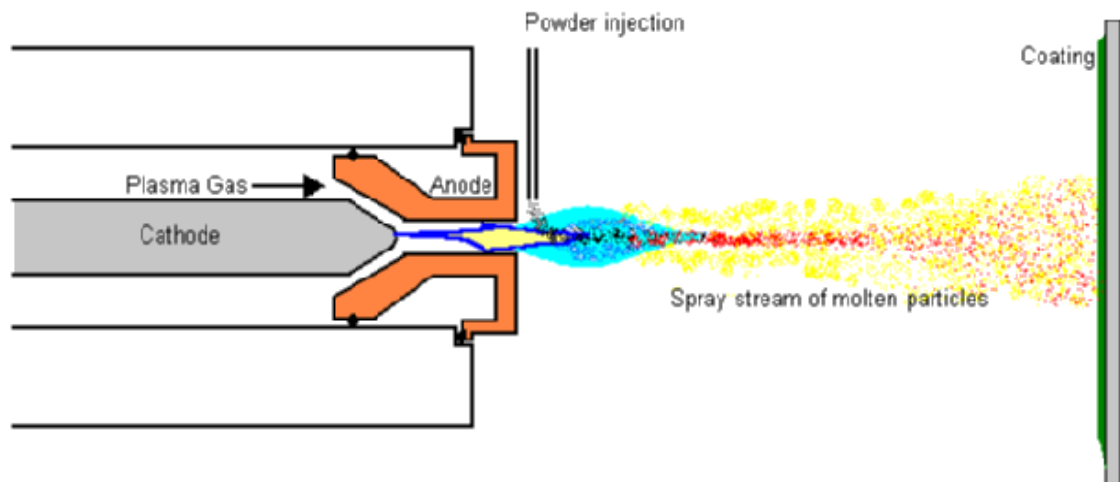


Fig. 16. Esquema del proceso de plasma spray (www.gordonengland.co.uk, Junio 2014).

El dispositivo utilizado para este proceso aparece ilustrado en la figura 17, consta de dos electrodos: un cátodo en forma cónica situado en el interior de un ánodo cilíndrico, que se extiende más allá del cátodo, formando una boquilla en su extremo. La refrigeración de los electrodos durante el proceso, se realiza por medio de unos circuitos con agua en circulación en su interior, lo que evita la fusión de dichos electrodos.

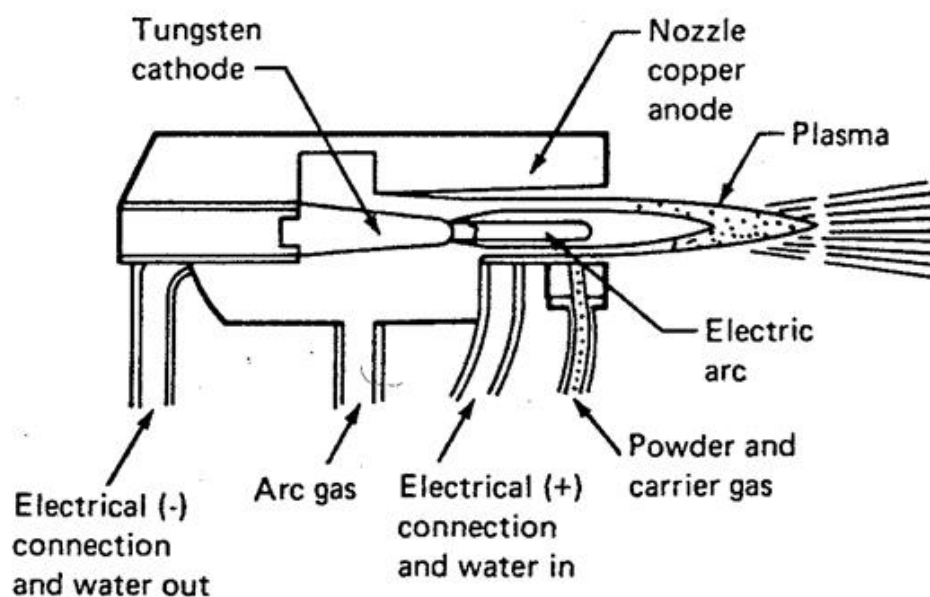


Fig.17. Cañón de plasma-spray (Mordike y otros, 1986).

El cañón comienza a operar cuando un impulso de corriente crea un arco entre los dos electrodos. Este arco es mantenido por una corriente estacionaria de elevada intensidad y con un potencial de alrededor de 50 voltios (Mordike y otros, 1986). Un gas inerte fluye a través del espacio comprendido entre los dos electrodos, el cual y debido al arco eléctrico establecido disocia sus moléculas en sus átomos constituyentes ionizándolos. De este modo, el gas existente en el interior del arco se transforma en un conjunto de iones y electrones muy energéticos, es decir, un plasma. La corriente en su recorrido entre los dos electrodos alcanza la boquilla del cañón, formando allí una llama de plasma. Tanto la temperatura como la velocidad de dicho plasma son muy elevadas, tal como se ve en la figura 18.

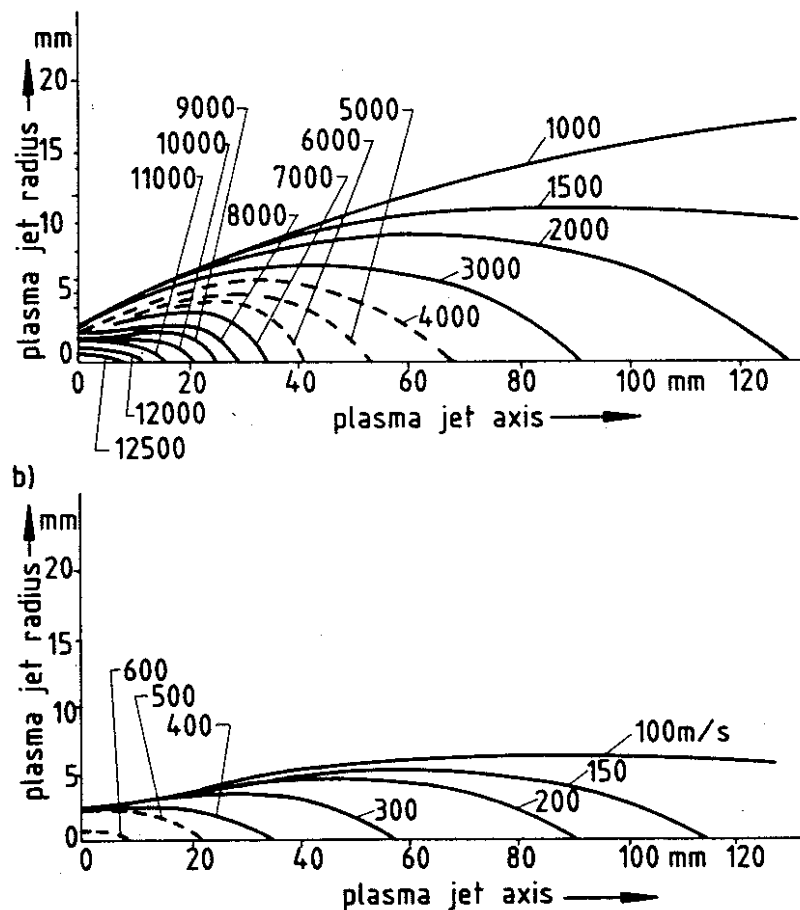


Fig. 18. Temperatura del plasma y velocidad de partícula (Vardelle, 1986).

En cuanto a la inyección de polvo, el material que va a originar el recubrimiento es transportado por medio de un gas portador, e inyectado en la llama de plasma, pudiendo estar el inyector de polvo situado en el interior o en el exterior de la boquilla.

La llama de plasma, acelera las partículas de polvo inyectadas, fundiéndose estas debido a la elevada temperatura del plasma. Estas gotas de material fundido salen dirigidas hacia la superficie del material a recubrir (sustrato); allí se solidifican y acumulan, originando un recubrimiento protector grueso y compacto (Barbezat y otros, 2001).

El criterio básico utilizado es que las partículas deben fundirse completamente, sin una excesiva vaporización, y permanecer fundidas hasta que colisionen con el sustrato. Si las partículas no se funden suficientemente, puede resultar un recubrimiento de pobre calidad.

Un factor a tener en cuenta es la interacción de las partículas con el sustrato. Cuando las partículas de polvo fundidas llegan al sustrato, colisionan con él; dicho sustrato ha de haber sido previamente sometido a un proceso de limpieza y de acabado superficial que le confiera cierta rugosidad para que aumente la adhesión del recubrimiento. Estas partículas se solidifican y van recubriendo todas las irregularidades del sustrato con el material proyectado (figura 19).

Las partículas continúan llegando y acumulándose sobre el recubrimiento en una cuantía que dependerá de la superficie a revestir y de la velocidad con que el cañón se mueva sobre dicha superficie (Barbezat y otros, 2001).

El proceso de pulverización de plasma es más comúnmente utilizado en condiciones atmosféricas normales. Aunque algunos procesos se llevan a cabo en entornos protectores utilizando cámaras de vacío llenas de un gas protector a baja presión.

La pulverización de plasma tiene la ventaja de que se pueden tratar materiales con alto punto de fusión tales como metales refractarios como el tungsteno y la cerámica. Los recubrimientos obtenidos por éste método son generalmente mucho más densos, y más limpio que otros procesos de proyección térmica.

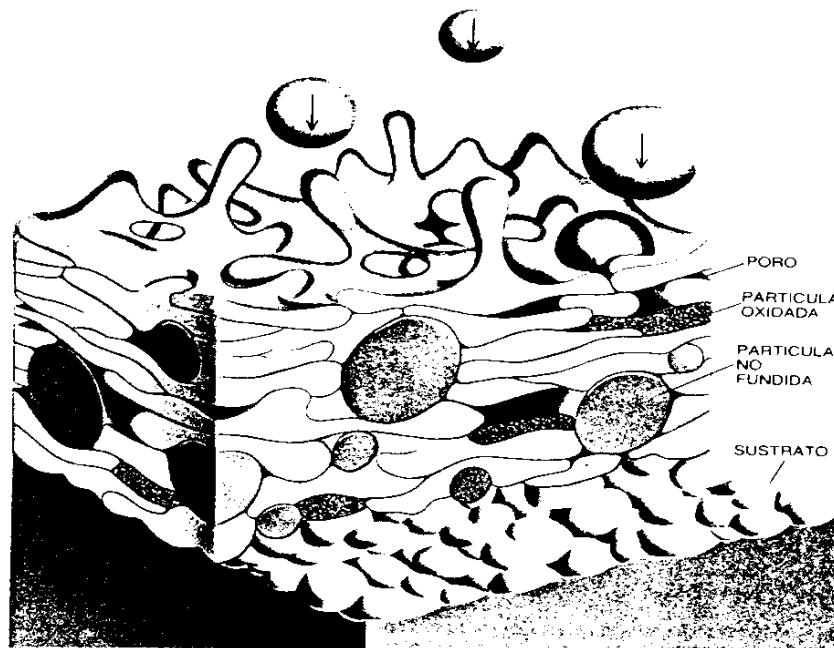


Fig.19. Formación de un recubrimiento (Barbezat, 2001).

Por tanto las ventajas y desventajas del plasma spray son:

Ventajas:

- Su empleo disminuye el riesgo de degradación del recubrimiento y del sustrato, en comparación con otros procesos a altas temperaturas.
- Se pueden tratar materiales con alto punto de fusión tales como metales refractarios como el tungsteno y la cerámica.
- Los recubrimientos obtenidos por éste método son generalmente mucho más densos, y más limpio que otros procesos de proyección térmica.
- Deposición rápida.
- Amplia zona de modificación superficial.

Desventajas:

- Alto coste.
- El sustrato ha de someterse previamente a un proceso de limpieza y de acabado superficial que le confiera cierta rugosidad para que aumente la adhesión del recubrimiento.

-Si las partículas no se funden suficientemente, puede resultar un recubrimiento de pobre calidad.

-La complejidad del proceso.

Aplicaciones:

-Protección contra diferentes mecanismos de desgaste: abrasión, adhesión, erosión y fretting.

-Protección ante los siguientes tipos de corrosión: oxidación, corrosión por gases calientes, atmosférica y corrosión por inmersión.

-Aislamiento térmico.

-Reparación de piezas con desgastes o defectos localizados.

(<http://www.gordonengland.co.uk/ps.htm>, Abril 2014)

5.3 Evaporación.

El objetivo es depositar sobre el sustrato una película delgada del recubrimiento a partir de sus vapores, tras un proceso de condensación.

El vapor se produce a partir del material seleccionado para el depósito ubicado en una fuente que se calienta por diversos métodos: resistencia, inducción, arco eléctrico proyección de electrones o láser.

Aplicaciones:

-Microelectrónica: contactos, barreras de difusión, aislamiento,

-Tribológicas: nitruros de titanio, alúmina, nitruros complejos,

-Resistencia a la corrosión.

Principalmente hay tres tipos de deposición en fase vapor: Deposición en fase vapor por vía física (PVD), deposición en fase vapor por vía química (CVD) y procesos activados por plasma (PECVD).

A continuación se explicarán estos tres métodos indicando las diferencias entre ellos. Además se darán detalles de cómo obtener el metal reactivo en cada caso, es decir, las distintas técnicas de obtención de los recubrimientos.

-DEPOSICIÓN EN FASE VAPOR POR VÍA FÍSICA (PVD).

El vapor se produce a partir del material seleccionado para el depósito ubicado en una fuente que se calienta por diversos métodos: resistencia, inducción, arco eléctrico proyección de electrones o láser. Se requiere realizar el vacío de la cámara al nivel de 10⁻³ a 10⁻⁸ Pa.

El esquema de una cámara de PVD se muestra en la figura 20.

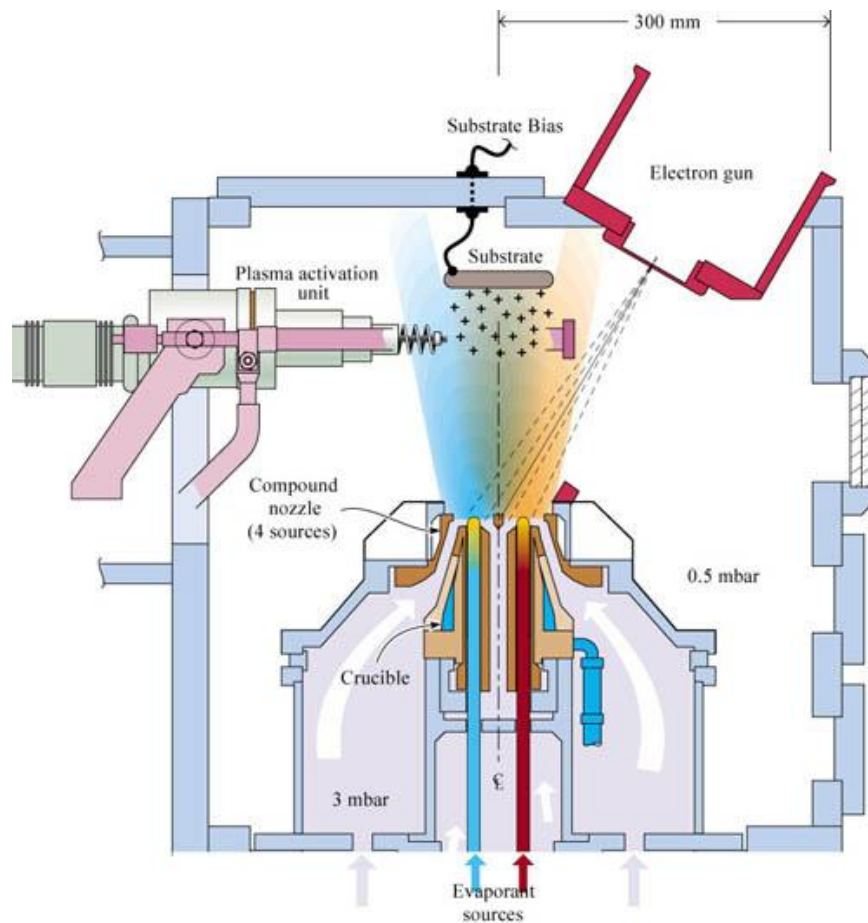


Fig.20. Esquema de una cámara de PVD.
(<http://prof.usb.ve/hreveren/PVD%20pagina.htm>, Junio 2014)

-DEPOSICIÓN EN FASE VAPOR POR VÍA QUÍMICA (CVD).

Son procesos en los que los productos reaccionantes en fase vapor se conducen a la cámara de reacción y mediante su activación, por medio del calor, del plasma o de láser, en la proximidad del sustrato, se produce la reacción y se deposita el producto sobre el mismo sustrato.

Se depositan películas muy uniformes y de baja porosidad.

En la figura 21 se puede observar el esquema de una cámara de CVD.

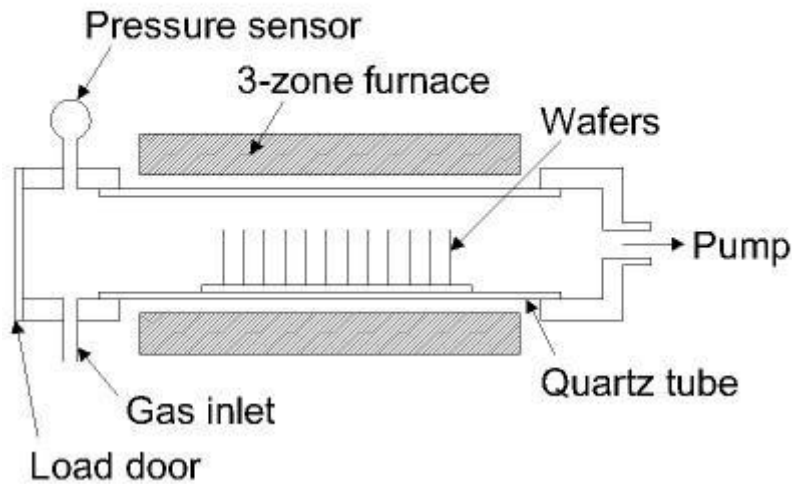


Fig. 21. Esquema de una cámara de CVD.

(<https://www.memsnet.org/mems/processes/deposition.html>, Mayo 2014)

-PROCESOS ACTIVADOS POR PLASMA (PECVD).

Los constituyentes en fase vapor reaccionan cuando son activados por una descarga de plasma, (los gases moleculares son disociados por el impacto de los electrones para generar reactivos, radicales y especies iónicas).

La ventaja es que opera a temperaturas bajas (fabricación de circuitos integrados).

En la figura 22 se puede observar como es una instalación de PECVD.

En cuanto a la obtención del metal reactivo, las distintas técnicas de obtención de recubrimientos PVD se caracterizan por conseguir evaporar e ionizar el metal reactivo (a partir de metal puro) por medios físicos. Pero cada método emplea un sistema de evaporación distinto y lo válida para ciertas aplicaciones.

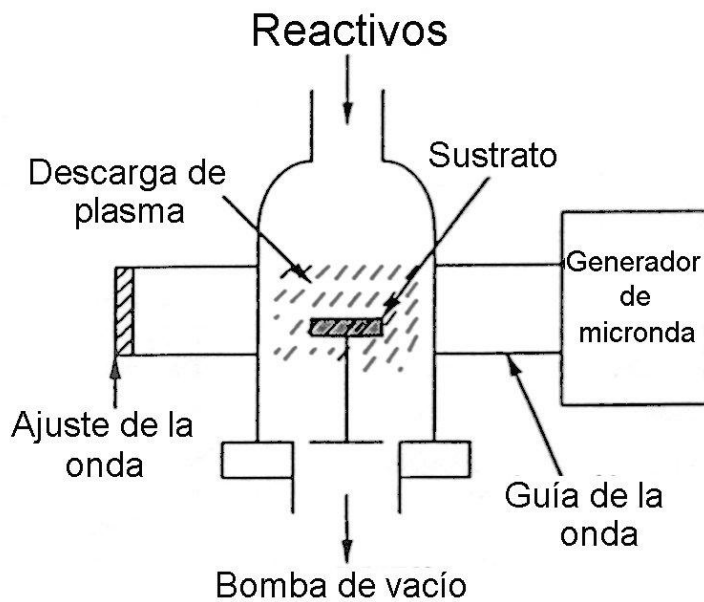


Fig. 22. La figura muestra un esquema de instalación de deposición química en fase de vapor activada por plasma. (Barreto y otros, 2001)

En las técnicas CVD, los precursores metálicos son compuestos gaseosos o líquidos fácilmente evaporables (halogenuros, metalorgánicos) del metal reactivo. Éste descompone con facilidad a la temperatura del proceso. La formación de compuestos se produce por las reacciones de los compuestos gaseosos introducidos en las proporciones precisas en el reactor.

Las técnicas denominadas PECVD (CVD asistido o mejorado por plasma) emplean, también, precursores gaseosos que son descompuestos por la activación de un plasma generado sobre las piezas a recubrir. El plasma ioniza los compuestos y activa las reacciones que tienen lugar durante el proceso a temperaturas moderadas.

En los procesos CVD térmicos, las variantes técnicas se fundamentan en el equipamiento auxiliar. Hay precursores que pueden ser almacenados ($TiCl_4$ en estado líquido vaporiza a temperaturas cercanas a $40^\circ C$) y hay precursores que deben ser obtenidos in situ ($AlCl_3$). En estos casos el equipo consta de una instalación de clorinación. Las presiones de trabajo condicionan los equipos de vacío, en los que deben ser neutralizados los gases corrosivos producto de las reacciones que han tenido lugar en la cámara del reactor.

La mejora en la distribución de los reactivos ha generado tecnologías propias de CVD como FBCVD o CVD en reactor de lecho fluidizado.

Obtenida la temperatura de 1000°C la disociación de los gases se produce de inmediato formando el compuesto que se deposita sobre la pieza y difunde hacia su interior. A temperaturas tan elevadas la difusión de compuestos en el material base se ve muy favorecida. Los gases reactivos, dependiendo de su naturaleza originan nitruros (N₂), carburos (CH₄), carbonitruros (N₂+CH₄), óxidos, boruros, etc. de los metales del precursor (Ti, Al, B). Acabado el proceso las piezas enfrían en la cámara hasta temperatura ambiente bajo atmósfera inerte.

Descripción más detallada merecen las distintas variantes de la tecnología PVD, que en muchos casos se confunden entre ellas, o una sola variante se asocia con la denominación PVD.

Si el sistema de evaporación se produce por calentamiento de un haz de electrones sobre un crisol conteniendo el metal, la técnica se denomina ion plating. Si la evaporación se produce por efecto de un arco eléctrico que se desplaza sobre el metal (cátodo) se trata de evaporación por arco. Si la evaporación se produce por bombardeo sobre el metal o cerámico (en este caso el blanco o cátodo no tiene por qué ser metálico) mediante un haz de iones de un gas inerte (Ar) la técnica se denomina Sputtering o pulverización catódica. La ionización puede ser optimizada mediante campos magnéticos (magnetron) aplicados sobre el blanco.

Generados los iones reactivos se introducen los gases a muy baja presión para formar los compuestos. Para depositarlos sobre las piezas, se aplica un "bias" y un sistema de giro de la carga análogo al utilizado en procesos PECVD.

En recubrimientos PECVD el desarrollo de las distintas variantes técnicas se ha centrado en una buena difusión de los gases y el sistema generador de plasma.

En los reactores industriales, el plasma es generado por RF (Radio Frecuencia) o por diferencias de potencial eléctrico, de polaridad fija o variable (plasma pulsante).

El plasma generado por R.F. permite recubrir materiales no conductores.

Los gases reactivos y las piezas son calentados a la temperatura del proceso tras la realización del vacío previo. El generador de plasma activa los reactivos TiCl₄, CH₄, N₂, etc. se forma el compuesto y se depositan sobre las piezas. En piezas conductoras se focalizan los iones mediante un campo eléctrico generado por una diferencia de potencial negativo o variable.

En algunos casos para conseguir la homogeneidad del recubrimiento en todas las piezas, la carga gira sobre un sistema de traslación y rotación planetario.

Una vez acabado el proceso, también en este caso se enfrían las piezas en atmósfera inerte.

Ahora se compararán las ventajas de estos tres métodos (PVD, CVD, PECVD). Y al final del capítulo se compararán de nuevo pero junto a las demás técnicas explicadas.

Las ventajas del **PVD** son:

- La temperatura de proceso es relativamente baja, oscila entre los 200-500°C, por lo tanto no es necesario volver a templar-revenir.
- Normalmente no requiere tratamientos posteriores.
- Poca influencia en el acabado superficial, en la forma y las dimensiones.

En cambio el proceso de **CVD** tiene unas ventajas distintas al PVD, como por ejemplo:

- Muy buena adhesión, por el contrario en los PVD existe riesgo de desprendimiento del recubrimiento.
- Mínimo riesgo de de laminación.
- Tratamiento muy uniforme incluso en recovecos.
- La limpieza previa no es crítica, en cambio en procesos de PVD la limpieza previa y el estado superficial son muy críticos.

En los procesos de **PECVD** las ventajas son las siguientes:

- La temperatura de proceso oscila entre los 400-550°C. Es una temperatura algo más elevada que en los PVD, pero se puede aplicar en algunos aceros sin tener que volver a templar.
- Normalmente no requiere tratamientos posteriores.
- Poca influencia en el acabado superficial.
- Mejor adhesión que el PVD y mínimo riesgo de laminación.
- Puede recubrir algunos recovecos y formas complicadas.
- Limpieza previa menos crítica que para el PVD.

Una vez conocemos bien en qué consisten las técnicas de implantación iónica, proyección térmica y las de evaporación, podemos ya introducir las técnicas láser, en concreto se explicará el laser cladding, para poder compararlo con las técnicas ya explicadas, y saber así cuales son más viables.

5.4. Tratamientos con láser.

5.4.1. Introducción.

El láser es una herramienta muy utilizada debido a su coherencia espacial o direccionalidad y a su coherencia temporal (al final este apartado se explicarán con más detalle estas dos propiedades). Además tiene una amplia gama de aplicaciones debido a las propiedades particulares del haz de radiación luminosa con su gran potencia concentrada (el láser), que hacen de él una herramienta ideal en muchas aplicaciones donde se precise una fuente controlada y localizada de energía. Si a este factor diferenciador inicial se le suma la facilidad para su control automático y regulación, se observa cómo se amplía el campo de utilización a otros usos en los que la precisión, la minimización de daños colaterales y la menor modificación de la características del material circundante y de sus dimensiones son importantes. De ahí el amplísimo rango de aplicaciones (Tian y Chen 2005).

Ahora se explicarán las dos propiedades que hacen del láser una herramienta tan utilizada, las cuales han sido mencionadas anteriormente.

-Coherencia espacial o direccionalidad: la radiación láser tiene una divergencia muy pequeña, es decir, puede ser proyectado a largas distancias sin que el haz se abra o disemine la misma cantidad de energía en un área mayor.

-Coherencia temporal: la luz láser se transmite de modo paralelo en una única dirección debido a su naturaleza de radiación estimulada, al estar constituido el haz láser con rayos de la misma fase, frecuencia y amplitud.

(<http://blog.ciencias-medicas.com/archives/77>, consulta realizada en Mayo 2014)

Después de esta breve explicación sobre las peculiaridades del láser, se puede dar paso a la explicación de las diferentes técnicas de recubrimientos láser.

Como se ha mencionado en los anteriores capítulos, los recubrimientos láser son un tratamiento superficial con adición de material. Se distinguen tres tipos atendiendo a la mezcla resultante entre el material de aporte y el material base.

Todos consisten en fundir el material de aporte y una parte del material base, pero se diferencian en los parámetros empleados, cantidad de material de aporte, velocidad relativa de desplazamiento y potencia (Schneider 1998).

- *Laser alloying* (aleación láser): material base y de aporte se mezclan completamente debido a la mayor difusión en estado líquido y el efecto de la convección dentro de la pileta.
- *Laser dispersing* (solución sólida con láser): se logra una solución de partículas sólidas del material de aporte en una matriz de material base fundido.
- *Laser cladding* (plaqueado láser): los dos materiales se funden completamente mediante el haz láser, pero se mezclan y reaccionan químicamente solo en la interfaz formada. En la sección transversal se diferencian tres zonas, material base fundido, mezcla y la capa superficial solo con el material de aporte fundido, que definirá las características superficiales.

A continuación se explicará más extensamente el laser cladding, ya que los otros dos tipos de recubrimientos no son objetivo del trabajo.

5.4.2. Laser cladding.

En este apartado se explicará con detalle qué es el laser cladding, para qué se utiliza, y cuáles son sus ventajas respecto a las técnicas anteriormente explicadas. Además también se describirán las diferentes formas para depositar recubrimientos por láser: mediante polvo pre-depositado y mediante soplado de polvo.

Los tratamientos con láser son ampliamente utilizados en la modificación de superficie de diferentes metales, debido a su alta coherencia, la direccionalidad y la alta densidad de energía. Además los recubrimientos preparados con láser muestran una microestructura densa y una fuerte unión metalúrgica con los sustratos.

El objetivo principal del laser cladding (LC) es recubrir un metal con otro formando una sólida unión interfacial o soldadura sin disolver el metal del recubrimiento o “clad” con el sustrato. La energía aportada crea un baño fundido en el sustrato en el que se deposita un material de aporte. El resultado es que se crea un cordón recubriendo el sustrato con una calidad de unión muy elevada en comparación con los otros métodos de aporte explicados anteriormente.

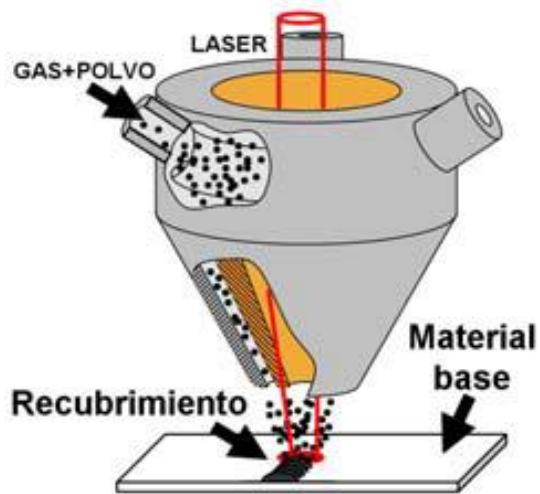


Fig. 23. Esquema de una operación de plaquedo láser (Dorronsoro 1996).

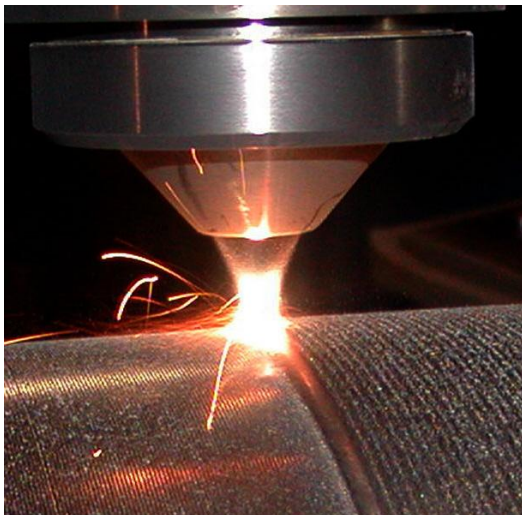


Fig. 24. (http://www.sirris.be/tiptoplam_nl.aspx, Abril 2014).

Como se puede observar en la imagen siguiente (figura 25), mediante la creación de sucesivos cordones se genera una capa o recubrimiento cuyo espesor oscila entre 0.1 y 2mm de espesor. A su vez, la superposición de sucesivas capas de material de aporte puede dar lugar a geometrías en 3D. El material de aporte se deposita en el sustrato en forma de hilo, polvo predepositado o, lo más habitual, en forma de polvo inyectado a través de una boquilla.

Este último caso es el más empleado por su versatilidad y calidad de los cordones generados. (Toyserkani y Corbin 2004).

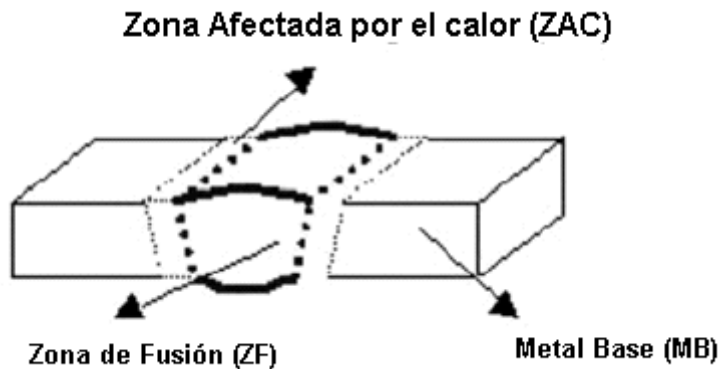


Fig. 25. Características dimensionales de un baño de fusión (www.scielo.org.ve, Junio 2014).

Dado que en el proceso de plakeado láser intervienen un número muy elevado de parámetros (potencia del láser, caudal de polvo, caudal de gas, avance de la boquilla, distancia de solape entre cordones, etc.) es habitual ajustar el proceso mediante la realización previa de ensayos experimentales para obtener una configuración óptima de los diferentes parámetros del proceso. El resultado de estos ensayos marca el diseño de las trayectorias y otros aspectos como la distancia entre cordones o la altura de cada capa. A su vez la elección de estrategias de aporte tiene influencia en la calidad de la pieza fabricada, pudiendo afectar en la calidad del recubrimiento obtenido así como a las tensiones residuales generadas. Por otro lado, las tensiones residuales y distorsiones geométricas generadas en las piezas son inevitables debido a la alta cantidad de energía que es requerida por el proceso y dependen en gran parte de las condiciones del proceso, de las propiedades del material y del tamaño de la pieza y el sustrato. Sin embargo existen estudios que confirman que este problema puede reducirse realizando una correcta selección de las estrategias de aporte (Dai y Shaw, 2002).

Además, las estrategias de aporte pueden influir en la resistencia del aporte realizado, ya que la estructura de la zona aportada no es homogénea sino que presenta unas propiedades mecánicas anisótropas. (Foroozmehr y Kong, 2009)

Las ventajas del proceso se derivan del empleo del láser como fuente de energía. Así, el aporte se realiza en una zona muy localizada y el daño térmico se localiza en una pequeña zona del material base en comparación con otros métodos de calentamiento como el plasma o arco eléctrico.

Por otro lado, el enfriamiento se realiza rápidamente sobre una atmósfera protegida por el propio gas que arrastra el polvo, por lo que se obtiene una alta calidad en la geometría generada.

Estas características permiten su uso en aplicaciones de recubrimientos de superficies con requisitos tribológicos específicos, la reparación de piezas de alto valor añadido y el prototipado o la fabricación a baja escala de piezas complejas.

La desventaja principal del laser cladding es su alto coste.

Además en el siguiente capítulo se explicarán concretamente los problemas que presenta el laser cladding cuando se aplica al titanio.

Sus aplicaciones:

- Protección al desgaste o a la corrosión: válvulas de motor, álabes de turbina, ejes, etc.
- Reparación y restauración: moldes y matrices, engranajes, cuchillas de corte, cigüeñales, etc.
- También es posible la fabricación directa por capas (*rapid manufacturing*) mediante la técnica del láser cladding. La creación de capas superpuestas permite fabricar piezas completas.

Ahora que ya se ha explicado qué es el laser cladding y cuáles son sus peculiaridades se definirán las diferentes formas para depositar recubrimientos por láser:

Laser cladding con polvo previamente depositado.

Es el sistema más simple para generar un recubrimiento, se deposita el polvo sobre la superficie con la ayuda de un adhesivo de manera que se forme una capa homogénea que permanezca sobre el sustrato hasta que el láser funde el polvo y parte de este sustrato.

Este método necesita un haz desenfocado con ayuda de un gas inerte que proteja el baño fundido para impedir la oxidación. Se puede conseguir una disolución mínima, aunque con una porosidad mayor que con la técnica de soplado de polvo ya que el frente de material fundido avanza desde la superficie hasta el sustrato.

Debido a este mecanismo de transmisión de calor, esta técnica puede presentar problemas de adherencia ya que el polvo fundido se intenta adherir al sustrato que permanece a una temperatura mucho menor hasta que se acumula el calor y por lo tanto, en aquellos materiales con baja mojabilidad, el polvo tiende a replegarse sobre sí mismo.

Laser cladding mediante soplado de polvo.

El principal interés de esta técnica es debido a que permite recubrir perfectamente regiones discretas de un componente así como por su facilidad de automatización. El sistema más sencillo consiste en una boquilla lateral a través de la cual se sopla un gas inerte que arrastra al polvo metálico desde un dispositivo que lo alimenta con un caudal constante.

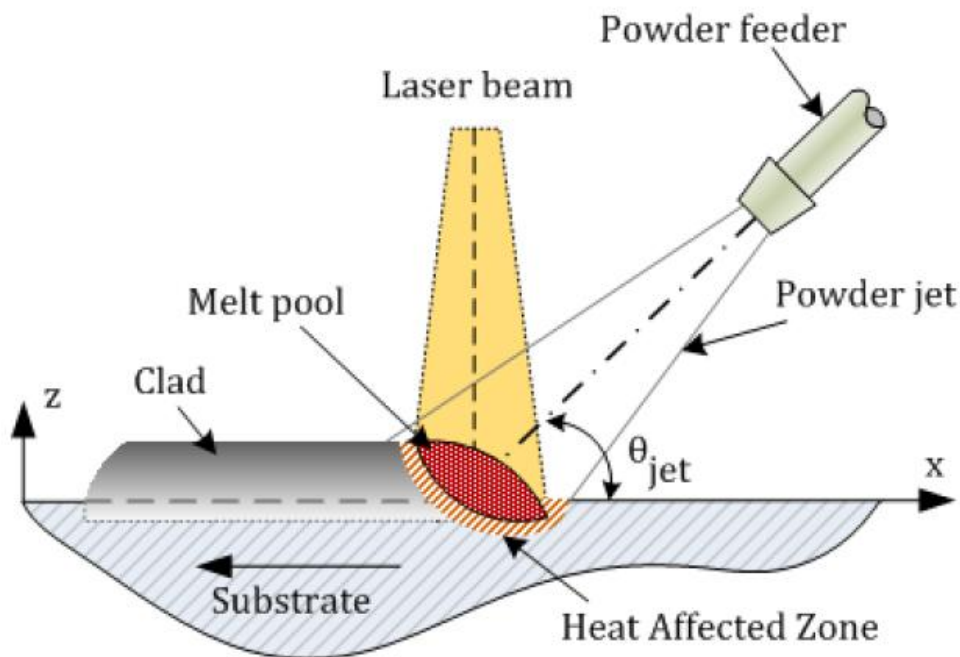


Fig. 26. Esquema de la técnica laser cladding mediante soplado de polvo. (http://resonance.uwaterloo.ca/p/research_areas/, Junio 2014).

De esta manera el polvo es introducido en el haz láser a unos cuantos milímetros por encima de llegar al sustrato, con lo que se funde el polvo y se incorpora al baño fundido generado. Sin embargo, este sistema no cuenta con una elevada eficiencia ya que sólo se consigue depositar alrededor del 40% del polvo soplado y además no se obtiene un buen recubrimiento debido a que todo el polvo debe salir de un único orificio. Por estos motivos se han desarrollado numerosos dispositivos comerciales basados en **boquillas coaxiales**.

En estos sistemas, el polvo se introduce de forma coaxial al haz y de esta manera se incrementa la eficiencia del sistema.

Además se cuenta con un gran orificio coaxial por donde pasa el haz y otros situados en la periferia por los cuales se introduce un gas inerte de protección que impide la oxidación sin causar turbulencias. De esta manera se pueden procesar materiales con una gran tendencia a la oxidación (como el aluminio o el titanio) ya que se consiguen niveles de oxígeno por debajo de 10ppm.

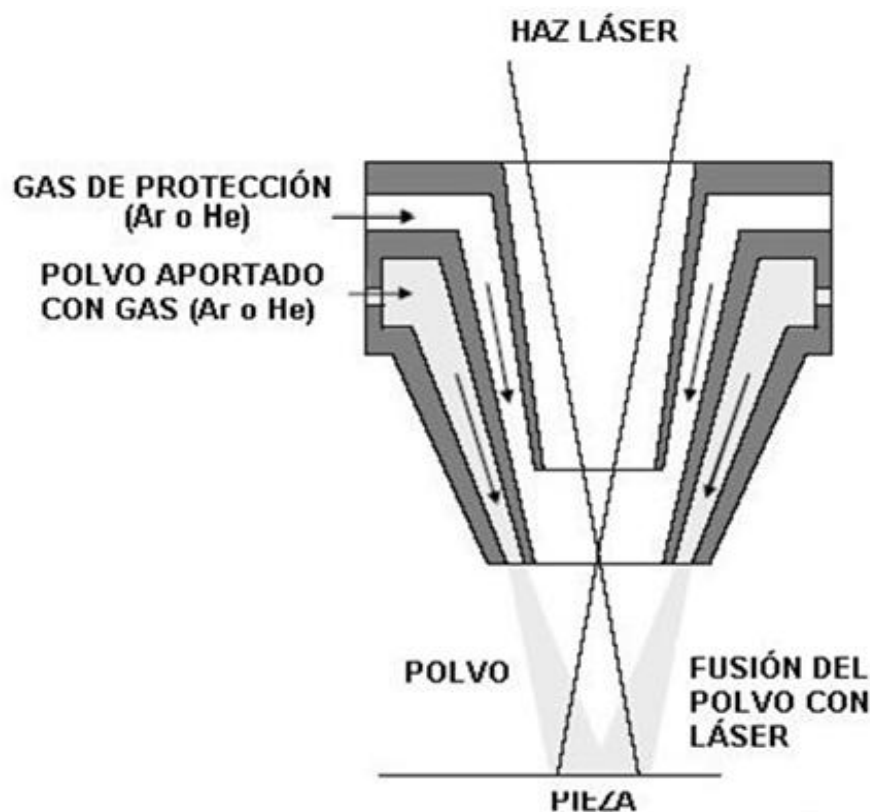


Fig.27. Esquema de funcionamiento de una boquilla coaxial (Dorrnsoro 1996).

Debido a los avances tecnológicos en la actualidad se pueden encontrar sistemas coaxiales basados en boquillas de cortina que permiten una gran precisión o basados en boquillas direccionales que permiten el procesamiento en horizontal y vertical (recubrimientos 3D) tal y como se muestra en la figura 28.

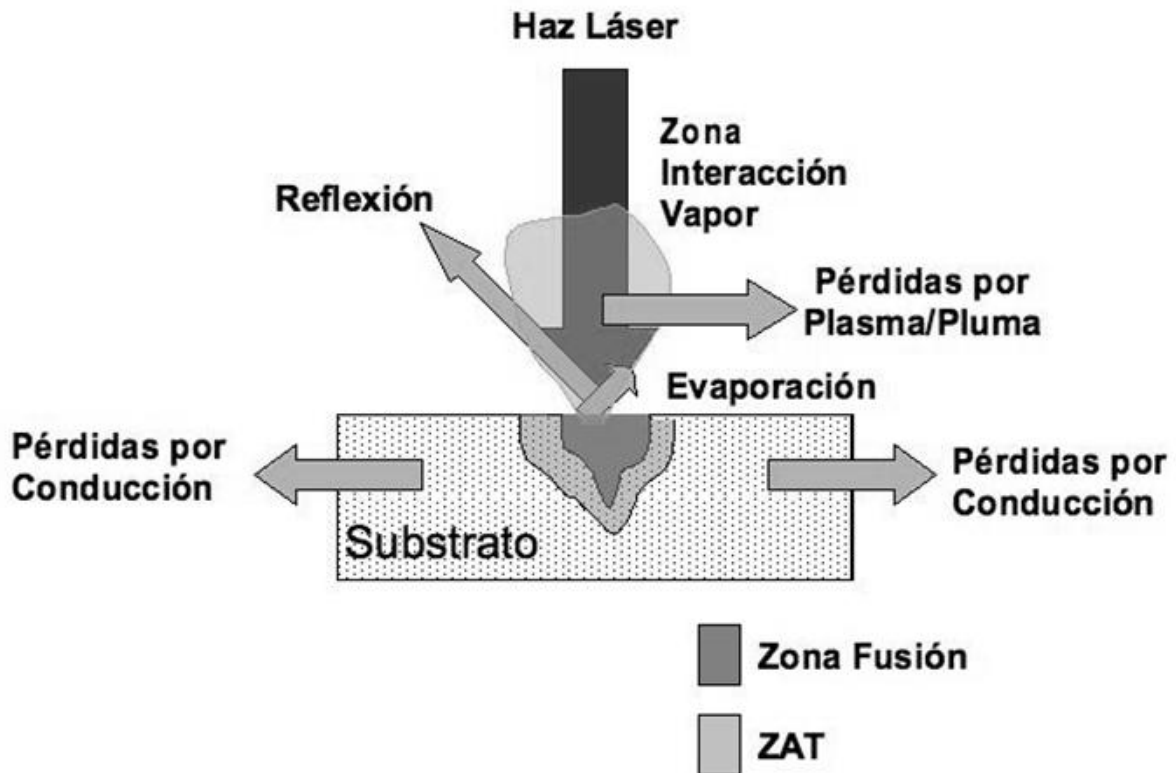


Fig. 28. Boquillas coaxiales comerciales: cortina de polvo (izquierda) y de 3 orificios (derecha). (Steen 2003)

Aunque el proceso de laser cladding se ha descrito de forma sencilla, es un proceso extremadamente complejo.

En la figura 29 se presenta el esquema de la interacción láser-materia durante el proceso de laser cladding.

Aparece una zona de interacción del polvo con el láser en la que se puede generar un plasma o pluma en la que el material, finamente dividido absorbe gran cantidad de energía. Parte de ésta energía se pierde por la formación del plasma y no llega al sustrato, pero debido a que la reflexión disminuye en gran medida la eficiencia global del proceso se incrementa.



Realizando un balance energético del proceso se puede decir que:

$$E_{total} = E_{reflexion} + E_{evaporacion} + E_{plasma} + E_{ZAT} + E_{fusion} + E_{conduccion}$$

Ecuación 1. Balance energético del proceso de laser cladding.

La energía perdida en la evaporación del polvo es aproximadamente el 2% , un 10% se aprovecha para la fusión del polvo. La energía restante es reflejada en un 50% aproximadamente, otro 8% es perdida en la formación de plasma y el 30% restante es aprovechada por el cladding para fundir el sustrato (ZAC) (Ghedda 2000).

El alimentador de polvo también juega un papel crucial ya que debe conseguir una alimentación lo más estable posible, porque cualquier oscilación queda reflejada en el cordón depositado. Por otro lado, la precisión también es muy importante ya que se pueden requerir caudales máxicos tan pequeños como 0,1 g/s. Además debe ser un sistema que evite el apelmazamiento del polvo así como la humedad.

Una vez queda clara la forma de proceder cuando se aplica el laser cladding, sus ventajas, aplicaciones y las diferentes formas que hay para depositar recubrimientos por láser, se puede para finalizar hacer una comparación de todas las técnicas explicadas en éste capítulo mediante una tabla en la que se exponen las ventajas y desventajas de dichas técnicas.

Las técnicas expuestas son: la implantación iónica, el spray plasma, la evaporación (y más en concreto las técnicas de CVD, PVD, PECVD) y por último la técnica de laser cladding.

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Implantación iónica	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de proceso muy baja (<150°C). • No precisa tratamientos posteriores. • Acabado superficial, forma y dimensiones totalmente inalteradas. • Sin posibilidad de desprendimiento. • Tratamientos sin riesgos. • Limpieza previa necesaria pero no tan crítica como en PVD. 	<ul style="list-style-type: none"> • Zona de modificación superficial poco profunda. No adecuada para desgaste abrasivo severo. • Elevado coste. • Proceso direccional. • No adecuada para herramientas que trabajan a alta temperatura (>300°C).
Spray Plasma	<ul style="list-style-type: none"> • Deposición rápida. • Amplia zona de modificación superficial. 	<ul style="list-style-type: none"> • Acabado superficial grosero. • Requiere capa de adherencia. • Interfase abrupta. • Difícil de controlar la composición de la cobertura.
Evaporación	<ul style="list-style-type: none"> • Amplio rango de materiales disponibles. • Composiciones adaptables. • Coberturas de elevada pureza. 	<ul style="list-style-type: none"> • Películas delgadas. • Interfase abrupta.

PVD	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de proceso relativamente baja (200-500°C): normalmente no hay que volver a templar-revenir. • Normalmente no requiere tratamientos posteriores. • Poca influencia en el acabado superficial, en la forma y las dimensiones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso direccional. • La temperatura del tratamiento puede afectar a aceros con revenidos a baja temperatura. • Añade 2-3µm a las dimensiones de la herramienta. • La limpieza previa y el estado superficial son muy críticos. Cuando no son perfectos no se puede aplicar el PVD. • Riesgo de desprendimiento del recubrimiento. • Puede no ser suficiente para el desgaste abrasivo severo.
CVD	<ul style="list-style-type: none"> • Muy buena adhesión. Mínimo riesgo de de laminación. • Tratamiento muy uniforme incluso en recovecos. • La limpieza previa no es crítica. 	<ul style="list-style-type: none"> • La temperatura del proceso alcanza los 1000°C. Puede causar deformaciones. En aceros será preciso templar después del tratamiento. • Añade 2-3µm a las dimensiones de la herramienta. • Altera el acabado superficial. Puede ser necesario pulir después del recubrimiento.

<p>PECVD</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de proceso (400-550°C). Se puede aplicar en algunos aceros sin tener que volver a templar. • Normalmente no requiere tratamientos posteriores. • Poca influencia en el acabado superficial. • Mejor adhesión que el PVD y mínimo riesgo de laminación. • Puede recubrir algunos recovecos y formas complicadas. • Limpieza previa menos crítica que para el PVD. 	<ul style="list-style-type: none"> • La temperatura del tratamiento puede afectar a aceros con revenidos a baja temperatura. Puede causar deformaciones. • Añade 2-3μm a las dimensiones de la herramienta.
<p>Laser cladding</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Como el aporte se realiza en una zona muy localizada el daño térmico se localiza en una zona muy pequeña. • Se obtiene una alta calidad en la geometría generada. • Elevada calidad de unión • Alta coherencia, direccionalidad y alta densidad de energía en el proceso. • Recubrimientos con microestructura densa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto coste.

Tabla 6. Ventajas y desventajas de los tratamientos explicados.

Dado que se ha explicado con detalle en este capítulo cómo se aplica el laser cladding, y también se han dado a conocer en el tercer capítulo las propiedades y peculiaridades del titanio, se puede ya concretar la problemática del procesado por láser del titanio.

6. Problemática del procesado por láser del titanio.

Para conseguir buenos recubrimientos de titanio es crucial optimizar el proceso, ya que las aleaciones de titanio tienen tres peculiaridades que obligan a un estricto control:

- Posee una elevada reactividad cuando está fundido con los elementos de la atmósfera. Reacciona con el nitrógeno, el oxígeno y el vapor de agua. Por eso, será fundamental una protección extrema del proceso (Sexton 2002).
- Es fundamental maximizar la productividad porque uno de los principales campos de aplicación para el LC de titanio son grandes componentes aeronáuticos. Teniendo en cuenta el pequeño tamaño del diámetro o “spot” láser, es importante maximizar la velocidad de recubrimiento para que sea rentable (Lavin y Byrne 2002).
- Muchas aleaciones de titanio son muy caras y de difícil mecanizado, por eso es importante ajustar las dimensiones y reducir la pérdida de material (Khajepour 2010).

A continuación se profundizará en los conocimientos del láser cladding que ya se han expuesto en el anterior capítulo, pero esta vez aplicado al titanio.

6.1. Modificación por láser de las aleaciones de titanio.

Como se ha comentado anteriormente, las aleaciones de titanio poseen unas excelentes propiedades como baja densidad, alta resistencia mecánica y al calor, así como una excelente biocompatibilidad. Además, se pueden mejorar sus propiedades mediante la modificación superficial, incrementando así sus prestaciones y aplicaciones. Por estos motivos existe un interés creciente en desarrollar nuevos recubrimientos para las aleaciones de titanio, sobre todo aquellos realizados con láser, ya que es una de las herramientas más prometedoras en este campo (Tian y Chen 2005).

En este capítulo se explicarán primero aquellas propiedades que se quieren mejorar del titanio mediante tratamientos láser, y más adelante se profundizará en qué consisten dichos tratamientos.

Hay tres propiedades del titanio en las que los investigadores están centrando su atención, ya que supondría una aplicación directa para tres sectores estratégicos: el aeronáutico, el de automoción y el de la implantología quirúrgica:

- Mejora de la biocompatibilidad.
- Mejora de la resistencia mecánica y/o a la oxidación a elevada temperatura.
- Mejora de la resistencia al desgaste.

En este capítulo se desarrollarán sobre todo la mejora a la oxidación a elevada temperatura y la resistencia al desgaste, ya que son las propiedades más importantes en cuanto a las aplicaciones de ingeniería:

Mejoras en el área de los biomateriales.

Debido a sus excelentes propiedades de biocompatibilidad las aleaciones de titanio son ampliamente utilizadas como material para implantes. No obstante, mediante el uso de diferentes tecnologías láser puede mejorarse la actividad biológica del titanio o mejorar su pobre resistencia al desgaste.

A pesar de ser una aplicación importante del titanio ésta no es objetivo del trabajo y por lo tanto no se desarrollará.

Mejora de la resistencia mecánica y/o a la oxidación a elevada temperatura.

Debido a que las aleaciones de titanio presentan una pobre resistencia a la oxidación a temperaturas por encima de 600°C, no pueden utilizarse en algunos componentes como por ejemplo en turbopropulsores. Una alternativa para aumentar su temperatura máxima en servicio son los recubrimientos de barrera térmica “thermal barrier coatings (TBCs)” siendo la proyección térmica por plasma atmosférico (APS) una de las técnicas más utilizadas (Zhou 2007).

En esta área, Meng et al. (2005) han trabajado con recubrimientos por laser cladding de NiCoCrAlY sobre Ti-6Al-4V comprobando que es posible obtener capas sin grietas ni poros y con una buena unión metalúrgica con el sustrato. Además, se consigue doblar la dureza del sustrato y se obtiene una mayor resistencia al desgaste (Meng 2005). Otras alternativas, como los recubrimientos basados en intermetálicos de Ti-Co-Si, son capaces de aumentar la resistencia a la oxidación a temperaturas por encima de 800°C gracias a la formación “in situ” de Ti₅Si₃ (Wang 2008).

Además en los últimos años, los aluminuros de titanio (TiAl) han sido considerados uno de los materiales más prometedores para la industria aeronáutica, debido a sus excelentes propiedades mecánicas a elevadas temperaturas.

Mejora de la resistencia al desgaste

La resistencia al desgaste es una de las propiedades más importantes que suscitan la atención de casi todos los ingenieros, cuando las partes de una máquina están sujetas a fricción.

Mediante la selección de los materiales y parámetros adecuados, se pueden obtener recubrimientos con excelente resistencia al desgaste.

Durante el proceso, los materiales de recubrimiento, así como una fina capa del sustrato se funden y solidifican a la velocidad del barrido láser. El mecanismo de refuerzo de la capa de recubrimiento se puede resumir de la siguiente manera.

-Endurecimiento por afino de grano: debido a la alta velocidad de calentamiento y enfriamiento, la microestructura de los recubrimientos láser es más fina que el sustrato.

-Fortalecimiento de la dispersión: fases reforzadas ya sea inherentemente en los materiales de recubrimiento o sintetizado in situ durante el procedimiento de recubrimiento, se dispersan de manera uniforme en la matriz.

Para mejorar la resistencia al desgaste de titanio y sus aleaciones, recubrimientos con compuestos de matriz metálica (MMC) y recubrimientos con compuestos intermetálicos (IMC) sobre el sustrato han sido ampliamente utilizados.

El MMC se refiere principalmente a recubrimientos compuestos de matriz metálica reforzados de cerámica. Tales como TiC, TiB, TiB₂, TiN, SiC, WC que actúan como refuerzos.

El IMC se basa en los compuestos intermetálicos, tales como Ti-Al, Ti-Ni, Ti-Co.

Durante el proceso de recubrimiento por láser, Ti₃Al, TiAl y Al₃Ti (con propiedades excelentes, tales como alta rigidez y resistencia al desgaste) son sintetizados in situ, lo que ayuda mucho en la mejora de las propiedades tribológicas del recubrimiento.

El mecanismo habitual para mejorar la resistencia al desgaste de los metales es la inclusión de partículas duras. Para conseguirlo, en el campo de la modificación superficial por láser se han desarrollado recubrimientos compuestos de matriz metálica (MMC) reforzados con partículas cerámicas y/o intermetálicos (Alman y Hawk 1999).

Existen muchos recubrimientos compuestos de matriz metálica, aunque en este trabajo solo se explican como ejemplo los MMCs basados en carburo de titanio (TiC):

El TiC es uno de los carburos metálicos más duros (19.6-31.4 GPa) y provee una gran resistencia al desgaste de muchas aleaciones (Dogan y Hawk 1999). En el área de los recubrimientos por laser cladding con polvos predepositados (técnica explicada anteriormente) el TiC se ha utilizado ampliamente, entre 2000-2005, como refuerzo de aleaciones de Ni-Cr para recubrir Ti6Al4V con buenos resultados (Steen 2003). Estos recubrimientos destacan por una buena interacción partícula-refuerzo así como una excelente resistencia al desgaste y oxidación. No obstante, la problemática asociada al pegado del polvo al sustrato obliga a trabajar con energía elevada ($E > 4 \text{ kJ/cm}^2$) y esto provoca la disolución del TiC y la formación de dendritas (Tylczak 1999).

El laser cladding coaxial es una técnica muy potente para generar MMCs de gran calidad de otros materiales duros (Xiong 2008). Sin embargo, el titanio en polvo presenta una gran reactividad con la atmósfera por lo que se oxida con facilidad durante su interacción con el láser y su posterior enfriamiento. Para superar este problema es necesario un estricto control de los parámetros, especialmente de la energía y cantidad de polvo aportado, así como del gas de protección del proceso.

En 2008, Zhang et al utilizaron un sistema laser de CO_2 en modo continuo equipado con una boquilla coaxial para generar Ti-MMC sobre sustratos de titanio utilizando soplado de polvo. Los resultados indican que es posible obtener recubrimientos completamente densos y sin grietas, partiendo de diferentes mezclas de Ti+TiC. No obstante, la elevada energía aportada durante el proceso, reduce la dureza final del recubrimiento debido a la descomposición del TiC.

En el caso de utilizar un sistema laser de Nd:YAG y trabajar con mezclas de Ti6Al4V+TiC (15, 30 y 60%wt) para recubrir un sustrato de Ti6Al4, gracias a la mayor absorción del Nd:YAG así como al control de la energía aportada, se consiguen obtener recubrimientos densos y sin grietas con una menor afectación térmica.

Una vez se conocen bien cuáles son los objetivos de los tratamientos superficiales con láser, se puede ya hablar con más detalle de estos tratamientos.

Para entender las ventajas de ésta técnica es importante tener en cuenta que los recubrimientos preparados con láser, como bien se ha comentado en capítulos anteriores, muestran una microestructura densa y muestran una fuerte unión metalúrgica con los sustratos.

Además los rayos láser son ampliamente utilizados en la modificación de superficie de diferentes metales, debido a su alta coherencia, la direccionalidad y la alta densidad de energía.

Como se ha explicado en el capítulo anterior, se puede emplear un rayo láser desenfocado, junto con polvos predepositados o bien polvos de alimentación síncronos, formando una fina capa del sustrato fundida, la cual solidificará rápidamente, obteniendo así una unión metalúrgica con el sustrato.

En la figura 30 se muestra el esquema del proceso de recubrimiento con láser coaxial de una aleación de titanio Ti6Al4V como sustrato, con polvo de TiC y Ti6Al4V.

Hay numerosos factores que afectan a la calidad de la capa de recubrimiento de láser, tales como la potencia del láser (P), tamaño del haz láser (diámetro del haz D), y la velocidad de exploración por láser o la velocidad de movimiento (V). Además, el concepto de energía específica ($E_s = P / (D * V)$) se introduce en el recubrimiento láser.

Con el fin de conseguir las propiedades deseadas, un buen control de los parámetros del proceso es indispensable.

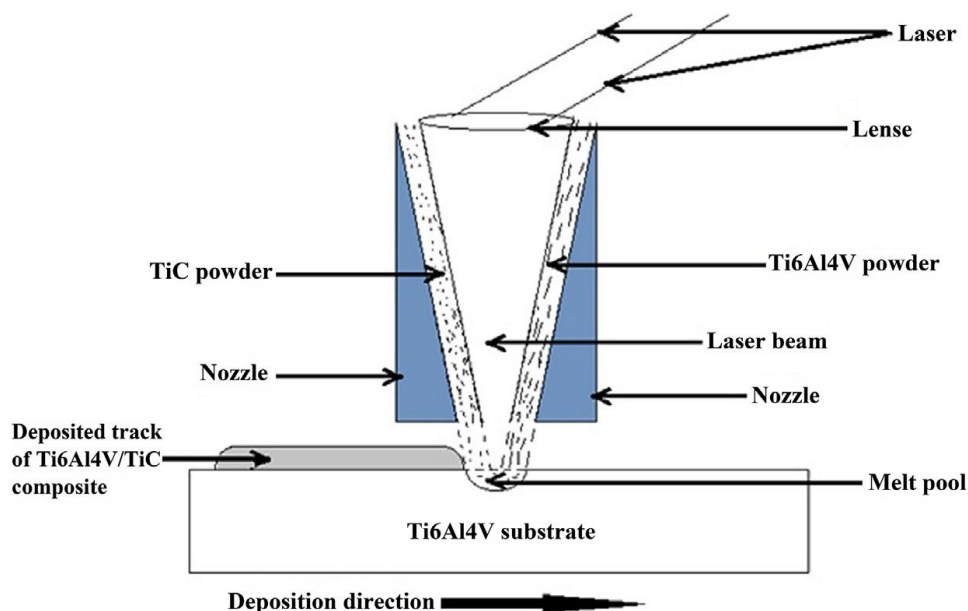


Fig.30. (Mahamood 2013)

Weng et al. (2013) han estudiado la influencia de la velocidad de barrido en la microestructura en evolución para lograr un control de las propiedades. Los resultados mostraron que las propiedades físicas, mecánicas, metalúrgicas y tribológicas del material compuesto Ti-6Al-4V/TiC podrían ser controlados de manera efectiva mediante el control de la velocidad de barrido. Cuando se incrementó la velocidad de barrido, el rendimiento de resistencia al desgaste también aumentó, hasta la velocidad de barrido de 0,065 m / s, después de la cual el rendimiento de resistencia al desgaste comenzó a caer. A baja velocidad de barrido, hay menos partículas de carburo sin fundir en el recubrimiento, lo que afecta en el rendimiento de baja resistencia al desgaste. Cuando la velocidad de barrido es alta hay grandes partículas de carburo no fundidas, lo que provoca más daño a la superficie de los materiales compuestos y da como resultado una pobre resistencia al desgaste.

Por tanto los recubrimientos compuestos fabricados con una mayor velocidad de barrido láser tienen una microestructura más fina, mayor microdureza y menor espesor (Weng y otros, 2013).

Los parámetros del láser juegan un papel crucial en el establecimiento de las morfologías de TiC por medio de la temperatura y la composición química.

El grado de dilución, como factor importante que influye en las propiedades de capa de recubrimiento, se define como la relación de la profundidad de recubrimiento (D) con la suma de la altura de recubrimiento (H) y de la profundidad de recubrimiento (D), es decir, $d = D/(D+H)$, como la figura 31 muestra.

Obviamente, diferentes parámetros del proceso conducen a diversas tasas de dilución.

En el recubrimiento por láser, son deseables los recubrimientos con excelentes propiedades de unión con el sustrato. El principal desafío es lograr la dilución más baja para elegir los parámetros de proceso adecuados.

No hay duda de que sólo bajo parámetros de proceso apropiados puede el recubrimiento por láser ser factible y conseguir recubrimientos excelentes. Por lo tanto, se debe tener en cuenta la optimización de los parámetros del proceso.

Es importante también elegir materiales de recubrimiento adecuados con el fin de obtener recubrimientos con las propiedades deseadas y calidad de la superficie. En general, tanto las propiedades físico-químicas del sustrato como los materiales de recubrimiento deben ser tomados en consideración.

Por tanto se seleccionarán los materiales de acuerdo a su condición de servicio.

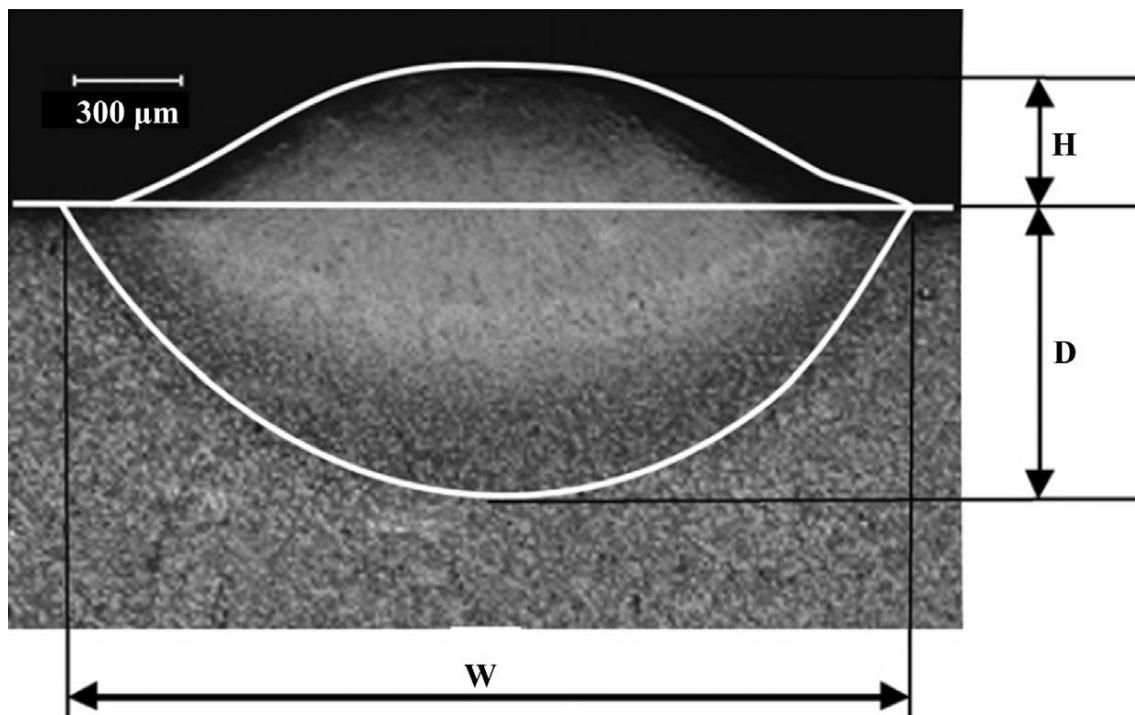


Fig.31. Características dimensionales de un baño de fusión (Hao 2012).

Principios de la selección de materiales de recubrimiento:

La compatibilidad es el principio más importante. Por un lado, los materiales de recubrimiento y el sustrato deben tener propiedades físicas similares tales como el punto de fusión (T_m), coeficiente de expansión térmica (C) y el módulo de elasticidad (E).

Una excesiva diferencia entre los puntos de fusión hace que sea difícil lograr una unión metalúrgica entre el recubrimiento y el sustrato. Del mismo modo, si la tensión residual es más alta que la que puede soportar el material da lugar a la formación de grietas o incluso la abscisión del recubrimiento, también ocurre si la diferencia de C y E entre los dos materiales es demasiado grande.

Por otro lado, la estructura cristalina y las propiedades químicas deben coincidir, lo cual está relacionado con el principio de humectabilidad. Que generalmente se conoce como la tendencia de los fluidos a pegarse a la superficie, ésta puede ser determinada por las características de la estructura de la superficie. Una mejor humectabilidad entre el material de recubrimiento y el sustrato mejora la unión metalúrgica.

Desde el punto de vista de humectabilidad interfacial, la tensión superficial del recubrimiento debe ser inferior a la tensión superficial crítica del sustrato.

Por lo tanto, los metales de bajo punto de fusión (por ejemplo, Co, Ni) y algunos metales reactivos (por ejemplo, Ti, Al) así como los compuestos pertinentes se emplean normalmente como materiales de recubrimiento.

En términos generales, la técnica de material de recubrimiento sobre los materiales metálicos se desarrolla a partir de un solo material para múltiples materiales.

Además los compuestos intermetálicos también se introducen en el recubrimiento láser en metales. Sin embargo, hoy en día, la investigación se centra en el cermet (es decir, compuestos cerámica-metal).

- *Cerámicas únicas y múltiples:*

El nitruro, carburo y óxido se utilizan por lo general como materiales de recubrimiento por láser sobre el titanio y sus aleaciones. Por ejemplo el TiN se utilizó como material predepositado para fabricar recubrimientos de aleaciones TC_4 por la técnica de plaquado láser.

La capa de recubrimiento láser se divide en dos subregiones, donde la parte de la superficie es TiN fundido en zona de solidificación con TiN dendritas demasiado delgadas y la parte inferior es TiN+Ti con partículas de TiN y Ti martensita.

La estructura en capas es beneficiosa para la combinación entre el recubrimiento y el sustrato. Bajo los parámetros apropiados, las partículas de TiN predepositadas sufren una fusión, descomposición y la reformación y luego refuerzos TiN_x son producidos con éxito por una reacción in situ.

El uso de óxido como material de láser, forma una unión interfacial efectiva, debido a la reacción química y la difusión interactiva de corto alcance en la interfaz.

Sin embargo, el uso de cerámicas individuales o múltiples como material de recubrimiento tiene algunas deficiencias, ya que la cerámica es muy frágil además de su alta dureza.

Los defectos se forman fácilmente en los recubrimientos, especialmente entre las fases reforzadas y la matriz. Además, la fase cerámica puede no ser homogénea en el recubrimiento si se adopta la técnica predepositada.

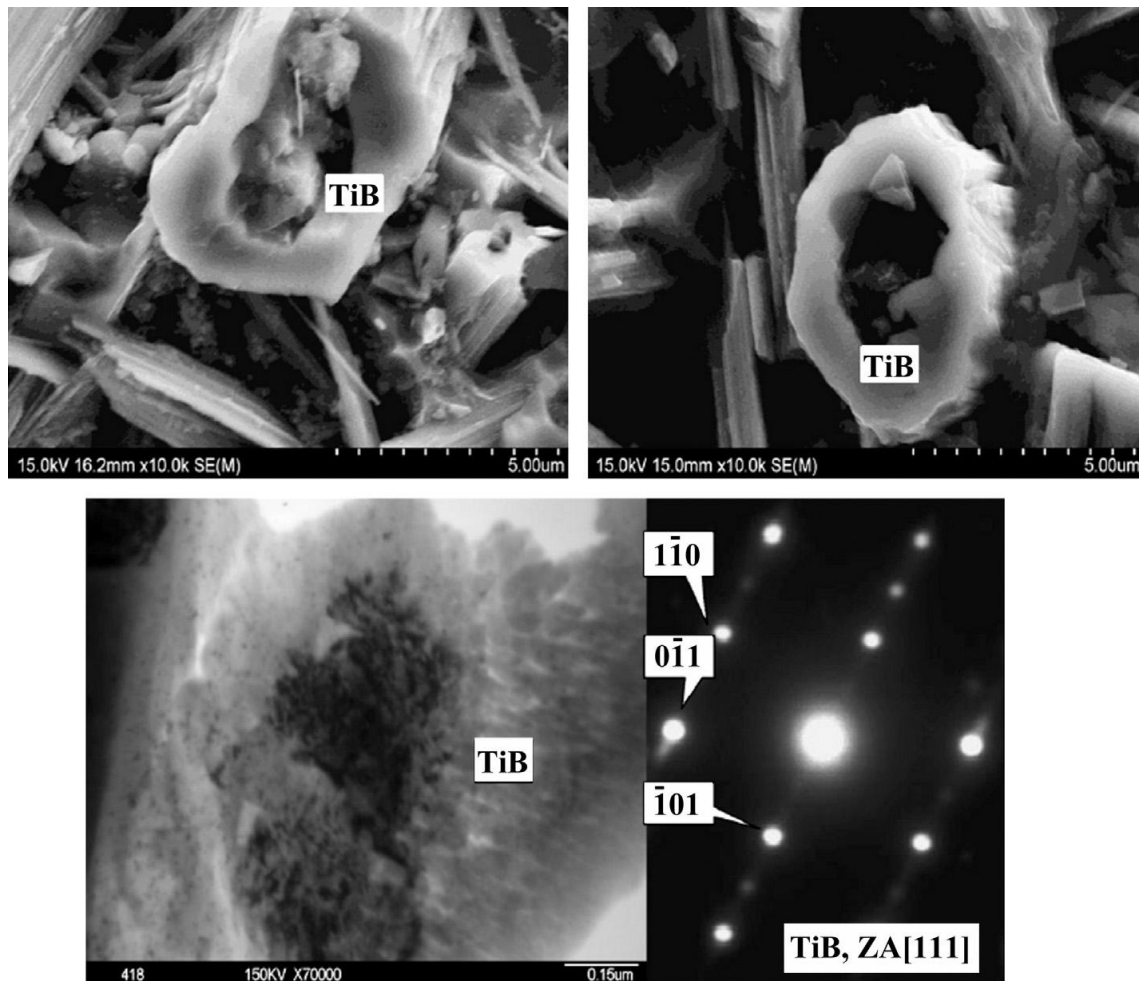


Fig.32. Imágenes del cristal de TiB con núcleo hueco. (Tian 2010)

- Metales o aleaciones simples y múltiples:

Aunque hoy en día los metales individuales o aleaciones se usan muy poco en plaquedo láser, han sido empleados como materiales de recubrimiento por láser durante muchos años.

Aparte de polvos metálicos puros, las aleaciones de hierro, cobalto y níquel son populares en plaquedo láser, especialmente aleaciones base Ni que exhiben mejor a alta temperatura, desgaste y propiedades de resistencia a la corrosión y fáciles de unir al sustrato.

Con el fin de mejorar la resistencia al desgaste de la aleación de titanio, se ha estudiado un proceso de recubrimiento láser con NiCoCrAlY sobre el sustrato de Ti-6Al-4V. Los resultados indican que la calidad de la superficie se ve afectada por el espesor del polvo predepositado y la velocidad de barrido láser.

Huijun et al. (2012) llevaron a cabo un plaquado láser directo de Co en Ti-6Al-4V y en la fig. 33 (a) se muestra el esquema de secuencias de éste recubrimiento láser. Después del tratamiento por láser, se obtuvieron dos capas, la capa de recubrimiento y la capa intermedia de aleación. La microestructura de la capa intermedia consistía en finos intermetálicos de Ti y Co con un contenido medio de Co que varía desde un 70% (en la superficie) hasta un 30% (en la interfase) en función de los parámetros del láser aplicados.

La morfología y el grado de refinamiento de la microestructura no variaron significativamente con la profundidad (fig. 33b y fig. 33d), pero la resistencia al desgaste de la capa de recubrimiento y la capa intermedia de aleación se mejoraron en comparación con el sustrato.

- *Los materiales compuestos:*

Los materiales compuestos son unos materiales muy utilizados en el recubrimiento láser del titanio. Las combinaciones de cerámica con metales son estudiadas cada vez más con el fin de obtener recubrimientos de compuestos de matriz metálica (MMC) en el titanio y sus aleaciones.

Durante el recubrimiento láser, se emplea un rayo láser desenfocado para fundir polvo sobre la superficie del sustrato, formando una unión metalúrgica entre el recubrimiento y el sustrato. Metales o aleaciones en el sistema de material compuesto actúan reduciendo las tensiones residuales y la tendencia al agrietamiento. Además, participan en las reacciones químicas durante el proceso de recubrimiento por láser, dando lugar a la formación de nuevas fases con las propiedades deseadas.

Por tanto el uso de materiales compuestos como materiales de recubrimiento son beneficiosos para la mejora de las propiedades (por ejemplo dureza y resistencia al desgaste), como se ha mencionado anteriormente.

Las fases cerámicas y los compuestos intermetálicos se distribuyen uniformemente en la matriz de los recubrimientos, dando lugar a la formación de carburos duros libres de porosidad, que son responsables de la dureza más alta.

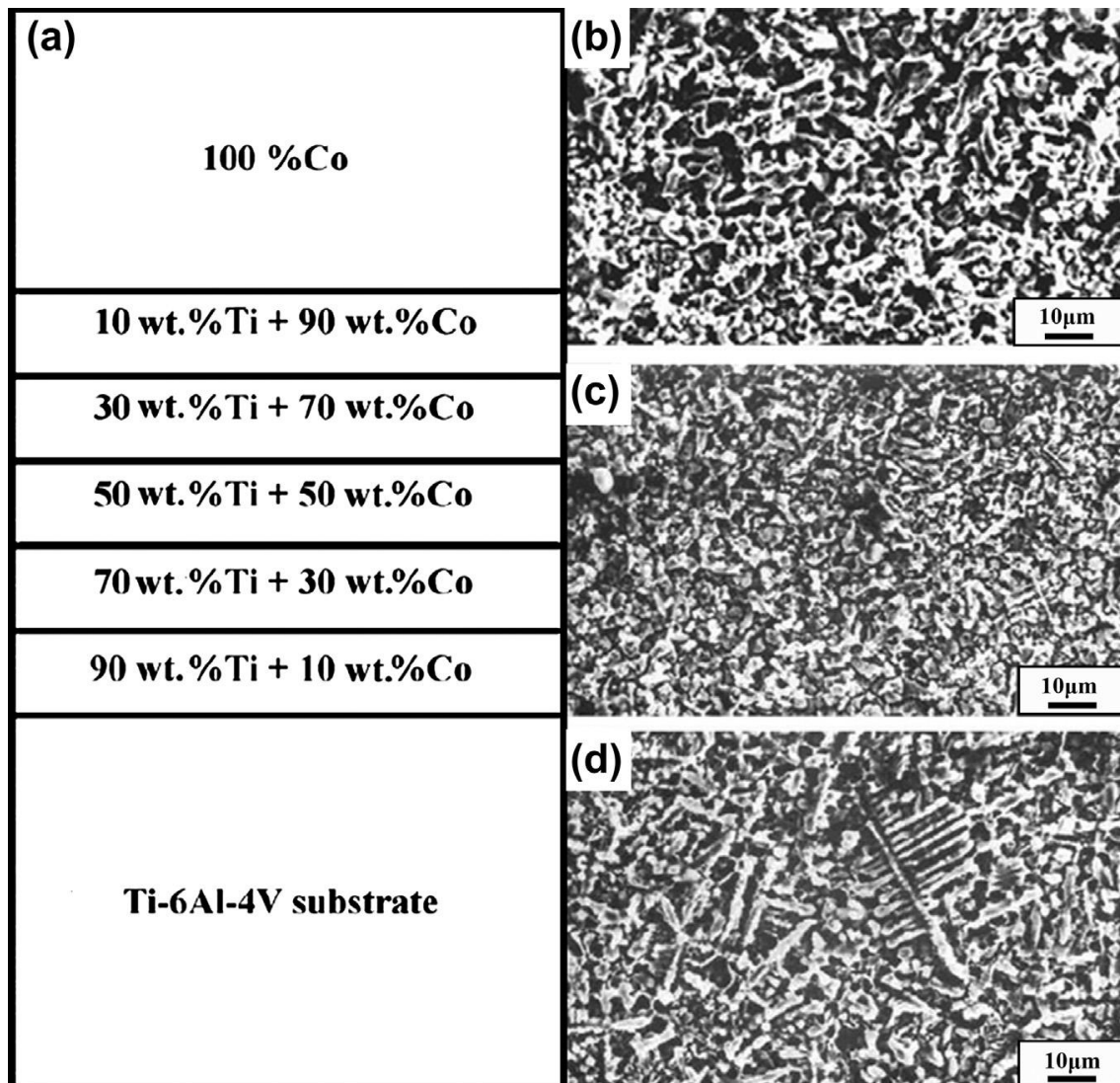


Fig.33. Esquema de secuencias de recubrimiento láser y las imágenes de la capa de recubrimiento láser. (Meng 2005)

Además, la aplicación de aleaciones de *auto-fundentes* (es decir, una serie de aleaciones que contienen B, Si, etc.) en el recubrimiento hace que sea más fácil obtener recubrimientos libres de poros e inclusiones. Esto es debido a que el Boro y el Silicio se oxidan fácilmente durante el proceso de recubrimiento láser y los productos de oxidación de baja densidad flotan en el baño de fusión, actuando como una capa de protección.

Por lo tanto, los recubrimientos libres de poros e inclusiones son fáciles de obtener debido al efecto desoxidante y escoria del B y Si.

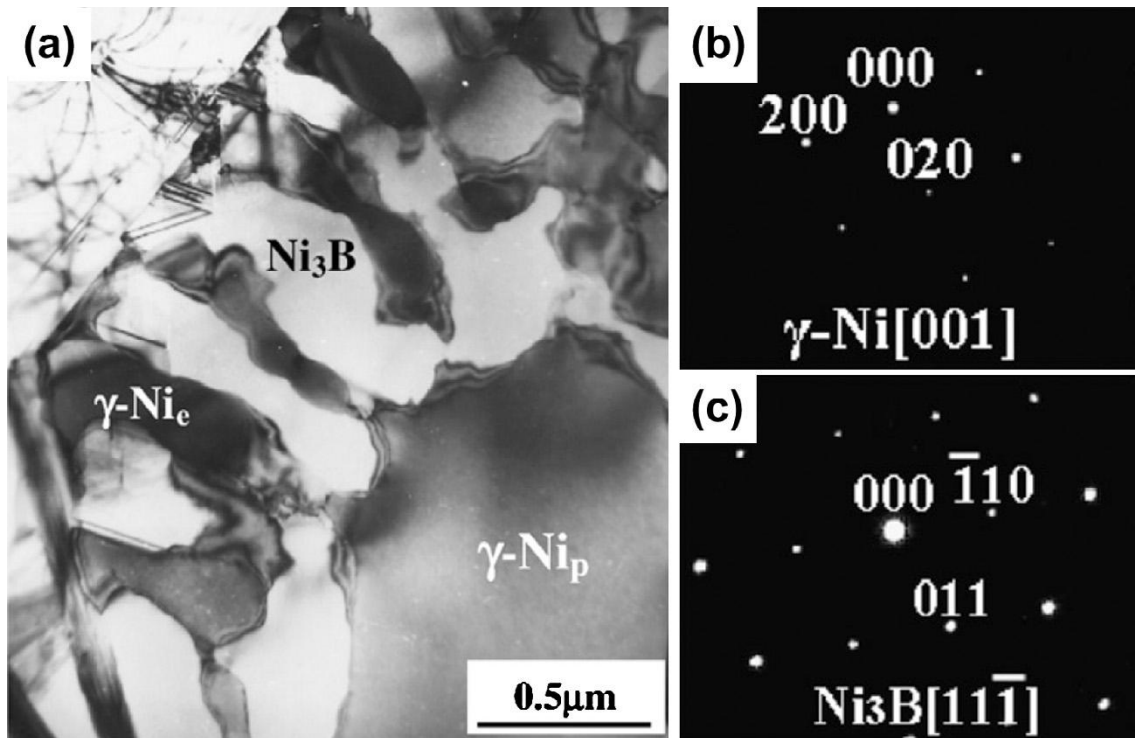


Fig.34. (Meng 2005)

Finalmente, se expondrán los problemas principales existentes, comentados en el capítulo anterior, con sus soluciones correspondientes.

Aunque el plaquado láser es sin duda superior a otros tratamientos de modificación superficial, sí hay algunos defectos, como por ejemplo las grietas y poros formados en la capa de recubrimiento.

Los poros son causados por el gas de protección residual durante el proceso de recubrimiento láser, que no tiene tiempo suficiente para escapar del baño de fusión. Con el fin de controlar estos poros, hay dos factores a tener en cuenta; en primer lugar, el material de recubrimiento debe ser seleccionado de acuerdo con los principios mencionados en la sección anterior, y en segundo lugar, se deben adoptar los parámetros adecuados del proceso.

En cambio, las grietas son casi inevitables durante el procedimiento de recubrimiento láser, debido a la alta tensión residual resultante de la alta velocidad de calentamiento y de enfriamiento.

Aplicaciones:

-Para biomateriales:

Recubrimientos por laser cladding con función gradual (FGM). El objetivo es obtener una biocerámica gradual de fosfato de calcio (HA) sobre sustrato de Ti6Al4V, este proceso está basado en la Hidroxiapatita (HA) la cual mejora la biocompatibilidad del titanio.

-Para la oxidación a elevada temperatura:

Una alternativa para aumentar la temperatura máxima en servicio son los recubrimientos de barrera térmica “thermal barrier coatings o (TBCs)” siendo la proyección térmica por plasma atmosférico (APS) una de las técnicas más utilizadas (Zhou 2007).

Estos recubrimientos de barrera térmica están basados en TiAl + Óxidos.

-Para mejorar la resistencia al desgaste:

Recubrimientos compuestos de matriz metálica con TiC, TiB₂.

Intermetálicos (NiAl, TiAl).

6.2. Ventajas y desventajas del procesado por láser del titanio.

Como se ha comentado en el inicio de éste capítulo, la problemática del procesado por láser del titanio es que posee una elevada reactividad cuando esta fundido con los elementos de la atmósfera, y por eso es fundamental una protección extrema del proceso. Además teniendo en cuenta el pequeño tamaño del diámetro del haz, es importante maximizar la velocidad de recubrimiento para que sea rentable y así poder maximizar la productividad.

Por último, al ser el titanio un material muy caro y de difícil mecanizado, es importante ajustar las dimensiones y reducir la pérdida de material.

Frente a estas desventajas, el procesado por láser tienes muchas ventajas comparado con los métodos convencionales, éstas son:

-Es un tratamiento localizado, ya que se produce un bajo aporte de calor y por tanto el área afectada térmicamente es mínima.



- Se obtienen solidificaciones rápidas, es decir, se dan calentamientos y enfriamientos rápidos, formándose microestructuras finas y/o fases metaestables.
- La energía total que aporta el láser no es muy elevada por tanto la distorsión térmica del sustrato.
- La dilución en el material base es mínima, es decir, el porcentaje del sustrato que se encuentra en el recubrimiento obtenido es muy bajo, por lo que no se alteran en absoluto las características del material aportado.
- Introduce una baja porosidad, es decir, se produce un relleno óptimo de material de aporte a nivel superficial.
- Conforma un amarre de tipo metalúrgico de gran calidad entre el material de aporte y el sustrato.
- Proporciona un buen acabado superficial, homogéneo y sin defectos.
- Se puede afirmar que es un proceso de alta precisión en las capas de material depositadas, tanto a nivel dimensional como a nivel metalúrgico.
- La fuente de energía, se puede controlar de manera fácil y precisa.

Por tanto se puede afirmar, después de analizar las ventajas y desventajas de los distintos tratamientos superficiales, que el laser cladding es la técnica más viable para conseguir recubrimientos homogéneos de calidad, consiguiendo así mejorar las propiedades superficiales del titanio frente a la oxidación a temperaturas elevadas y a la corrosión.

7. Referencias.

En este capítulo constan tanto las referencias bibliográficas citadas ya en la memoria, como las referencias consultadas para buscar información pero que finalmente no ha sido plasmada en la redacción de la memoria.

Además el acceso a estas referencias se ha realizado por medio de tres vías distintas: bibliografía (enciclopedias y libros), documentos obtenidos en bases de datos como “scopus” y “google scholar”, y finalmente información obtenida de páginas web.

Documentación encontrada en libros y enciclopedias:

- ASM Handbook 2004.Vol 2: Properties & Selection of Non-Ferrous alloys, 1770-1782.
- ASM Handbook 2004. Vol 6: Welding, brazing and soldering, 1953-1962.
- Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications. Editor(s): Christoph Leyens, Manfred Peters. Published: 28 JAN 2005.
- Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos. Alfonso José Vázquez Vaamonde, J. J. de Damborenea, Juan J. Damborenea González, 2001.
- Laser Cladding. Toyserkani, Ehsan; Corbin, Stephen; Khajepour, Amir. 2004
- Aliatges metàl·lics. Vicente Amigó Borrás (Autor), Ángel Vicente Escuder. 2003

Documentación encontrada en bases de datos:

- Grünenwald, B. et al. 1992, Laser Cladding with a Heterogeneous Powder Mixture of WC/Co and NiCrBSi, Proc. ECLAT '92, pp. 411-416
- Steen WM: Laser Material Processing, Springer-Verlag, London 2003, Third Edition.
- Dausinger, F., Hügel, H., 1993, Laser Cladding with Composite Powders Using Pyrometric Temperature Control and Beam Combining, Proc. ISATA '93, pp. 287-294
- Weng F, Chen C, Yu H: Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review (2013)
- Ghedda H, Powell J, Wahlstrom G. J Laser Appl 2000; 14: 78-82.
- Tian YS, Chen CZ, Li ST, Huo QH. Appl Surf Sci 2005; 242:177-184.
- Kim H, Camata R, Lee S, Rohrer G, Rollett AD, Vohra YK. Acta Mater 2007; 55:131-139.
- Khor KA, Vreeling A, Dong ZI, Cheang P. Mater Sci Eng A 1999; 266 (1-2): 1-7
- Meng Q, Geng L, Ni D. Mater Lett 2005; 59: 2774-2777.
- Tian YS, Chen CZ, Chen LX, Huo QH. Scripta Mater 2006; 54: 847-852.
- E. Toyserkani, S. Corbin, A. Khajepour, Laser cladding, CRC Press (2004)
- F. Vollertsen, K. Partes, J. Meijer, State of the art of Laser Hardening and Cladding, Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing 2005, Munich, (2005)
- X. Zhao, J. Chen, X. Lin, W. Huang, Study on microstructure and mechanical properties of laser rapid forming Inconel 718, Materials Science and Engineering A (2008)
- Smurov, I., Covelli, L., 1992, Synthesis of Nitride and Carbide Compounds on Titanium by Means of a Solid State Laser Source, Proc. ECLAT '92, pp. 251-256
- C.H. Townes. "The first laser". University of Chicago (2008).
- C.K.N. Patel. "Continuous-wave laser action on vibrational-rotational transitions of CO₂". Physical review (1964).

- Atamert, S., Bhadeshia, H.K.D.H., 1989, Comparison of the Microstructures and Abrasive Wear Properties of Stellite hardfacing Alloys Deposited by Arc Welding and Laser Cladding, Metall. Trans. A, vol. 20A, no. 6, pp. 1037-1054
- D.S. Gnanamuthu, E.V. Locke. "Surface modification". Avco. Everett Research Laboratory (1977).
- König, W., et al., 1989, Surface Treatment with the Laser Beam: A Discussion of Various Machining Methods, Annual Industrial Laser Handbook 1989, pp. 117-121
- Stern, A., Burchards, D., Mordike, B.L., 1990, Laser Cladding with Preheated Wires, Proc. ECLAT '92, pp. 223-228
- W.M. Steen, K. G. Watkins. "Coating and laser surface treatment". Journal de Physique (1993).
- M. Schneider. "Laser cladding with powder, effect of some machining parameters on clad properties". University of Twente (1998).
- M. Picasso, C.F. Marsden, J.D. Wagnière, A. Frenk, M. Rappaz. "A Simple but Realistic Model for Laser Cladding". Ecole Polytechnique Federale de Lausanne. C.F. (1994).
- R. Vilar. "Laser cladding". J. Laser Appl. (1999).

-Páginas web consultadas:

- <http://www.laserline-inc.com>
- <http://www.rofin.es>
- <http://en.wikipedia.org>
- <http://www.hardchrome.com.au>
- <http://www.abb.com>
- http://resonance.uwaterloo.ca/p/research_areas/
- <https://www.lia.org>
- <http://www.ojocientifico.com/4488/caracteristicas-del-titanio>
- http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13_4.html
- <http://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/123/1/TESIS45-100111.pdf?q=implantaci>
- <http://www.gordonengland.co.uk/ps.htm>
- <http://prof.usb.ve/hreveren/PVD%20pagina.htm>
- <https://www.memsnets.org/mems/processes/deposition.html>
- <http://blog.ciencias-medicas.com/archives/77>
- http://www.sirris.be/tiptoplam_nl.aspx

Presupuesto

Índice del presupuesto.

1. Recurso humano.	2
2. Equipos-software y bibliografía.....	2
3. Servicios técnicos y tecnológicos.	3
4. Materiales e insumos.	4
5. Precio total del presupuesto.	4

El presupuesto del presente trabajo está calculado basándose en el supuesto caso de que lo ha realizado una ingeniera de desarrollo en una empresa, en la cual uno de los directores dirige y asesora a dicha ingeniera durante su realización.

Se tienen en cuenta todos los requisitos que debe cumplir el alumno durante la realización del trabajo: número de horas de realización, bibliografía consultada, equipos utilizados, recurso humano, etc. Para conseguir así que el caso supuesto y el caso real se ajusten a la perfección.

Éste presupuesto presenta cuatro capítulos según el tipo de recurso utilizado, en los cuales se detallan y justifican los gastos de cada recurso. Y un quinto capítulo en el cual se proporciona el precio total por la realización de éste proyecto.

Por tanto los cinco capítulos del presupuesto son:

-Recurso humano: en él se tendrán en cuenta aquellas personas que han participado en la realización del proyecto.

-Equipos-software y bibliografía: están presupuestados los libros utilizados para la consulta de información y el ordenador, el cual se ha utilizado tanto para la redacción del trabajo como para la búsqueda de más información.

-Servicios técnicos y tecnológicos: para acceder a las bases de datos utilizadas es necesaria la conexión a internet, por lo tanto hay que tener en cuenta este gasto en el presupuesto, así como el coste de aquellos documentos extraídos en las bases de datos.

-Materiales e insumos: se calculan los costes por los materiales utilizados, tales como las fotocopias y la encuadernación del trabajo.

-Precio total: se sumarán los totales parciales calculados en los capítulos anteriores para conocer el precio total de todo el proyecto.

1. Recurso humano.

El recurso humano necesario será la ingeniera de desarrollo, que es la que realiza este proyecto, y uno de los directores de la empresa, el cual tiene la misión de orientar y asesorar a la ingeniera tanto al inicio como durante la realización de dicho proyecto.

El número total de horas estipulado para poder finalizar el trabajo son 300 horas, más las 15 horas de asesoramiento con el director. Por lo tanto el presupuesto parcial del recurso humano requerido es el siguiente:

	Horas/mes	Nº meses	Precio/hora	TOTAL
Ingeniera de desarrollo.	60	5	47.28 €	14184 €
Director de la empresa.	3	5	72.49	1087.35 €

Total	15271.35 €
-------	------------

2. Equipos-software y bibliografía.

El único equipo requerido es un ordenador de la empresa, el cual es utilizado por la ingeniera de desarrollo tanto para buscar información como para la redacción del trabajo. Además, para ésta búsqueda de información también se recurre a varios libros específicos del laser cladding, recubrimientos para el titanio, etc.

En el caso real estos libros no han tenido ningún coste ya que estaban disponibles en la biblioteca de la universidad, pero en el supuesto caso de que éste trabajo ha sido realizado en una empresa, la bibliografía si habría tenido un coste. Por lo tanto, en este supuesto el presupuesto sería:

Equipo	Justificación	Precio
Ordenador	Búsqueda de información y redacción del trabajo.	200 €
ASM Handbook Vol.2	Bibliografía para búsqueda de información.	273 €
ASM Handbook Vol.6	Bibliografía para búsqueda de información.	245 €
Titanium and Titanium	Bibliografía para búsqueda	294 €

Alloys: Fundamentals and Applications.	de información.	
Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos.	Bibliografía para búsqueda de información.	76.77 €
Aliatges metàl·lics.	Bibliografía para búsqueda de información.	24.63 €
Laser Cladding	Bibliografía para búsqueda de información.	108 €

Total	1221.4 €
-------	----------

3. Servicios técnicos y tecnológicos.

Al igual que en el anterior capítulo, en el caso real los servicios técnicos, tanto internet como las bases de datos consultadas en la universidad no han tenido ningún coste.

Pero en el caso de ser utilizados en una empresa, sí supondría un coste para ésta. Se ha estimado que se ha utilizado internet durante 200 horas, y que los documentos extraídos de la base de datos Google scholar (los cuales son gratuitos si se accede desde la universidad) tienen un precio medio de 30 € cada documento. De ésta forma el precio total por estos servicios es:

Servicio	Nº horas	Precio hora	Precio
Internet	198	0.14 €	27.72 €

Servicio	Nº documentos	Precio documento	Precio
Google scholar	14	30 €	420 €

Total	447.72 €
-------	----------

4. Materiales e insumos.

Para estimar los materiales e insumos utilizados, se ha tenido en cuenta la impresión de tres copias del trabajo, una para la ingeniera que ha realizado el proyecto, otra para el director que la ha asesorado y la última para el dueño de la empresa. Además de su correspondiente encuadernación.

También se han tenido en cuenta los costes de otras fotocopias que se han realizado de algunos documentos, borradores, etc.

Se ha estimado en el presente presupuesto que el precio medio por fotocopia es de 0.05€, ya que se harían en una reprografía externa a la universidad, y los precios son un poco más elevados en este caso.

Material	Precio/unidad	Nº unidades	Precio total
Papelería (fotocopias)	0.05€	513	25.65 €
Encuadernación	3 €	3	9 €

Total	34.65 €
-------	---------

5. Precio total del presupuesto.

Una vez hemos calculado los totales parciales, de cada recurso, podemos saber ya cual será el total invertido para la realización del proyecto.

Recurso	Precio
Recurso humano	15271.35 €
Equipos-software y bibliografía	1221.4 €
Servicios técnicos y tecnológicos	447.72€
Materiales e insumos	34.65 €
Presupuesto total	16975.12 €

Debe quedar constancia de que aquellos documentos y libros consultados que finalmente no se han utilizado en la redacción de la memoria no se han tenido en cuenta en este presupuesto, solo constan aquellos recursos que se ha aprovechado finalmente para el trabajo. Por tanto el precio total calculado es el mínimo requerido para la realización del proyecto.