

TESIS DE MÁSTER EN
INGENIERÍA MECÁNICA Y
DE MATERIALES

Modificación superficial de
aleaciones de titanio mediante
plaqueado por láser de polvos
con carburo de boro



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Departamento de
Ingeniería Mecánica
y de Materiales



Alumno: Jorge Ignacio López Palomares

Tutor: Dr. Vicente Amigó Borrás

VALENCIA, SEPTIEMBRE 2016

1

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Motivación del trabajo	8
1.2. JUSTIFICACIÓN (PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA).....	10
1.3. OBJETIVOS	11
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	11
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
2. ANTECEDENTES	12
2.1. Modificación superficial para aplicaciones de temperatura y desgaste	12
2.2. Láser cladding. TiB_2 . Efectos de los compuestos TiC y TiO_2	14
2.2.1. Proceso de Láser cladding	14
2.2.2. Parámetros básicos del proceso de láser cladding.....	17
2.2.3. Compuestos de Titanio y Boro. TiB_x . Efectos TiC y TiO_x	18
2.3. Justificación del uso del compuesto B_xC	19
3. Planificación de la investigación.....	22
Fases.....	22
3.1. Fase I: Planificación	22
a. Documentación bibliográfica.....	22
b. Definición y obtención de materiales y muestras y definición equipos	23
4. Desarrollo experimental.....	28
4.1 Caracterización microestructural	28
4.1.1 Preparación metalográfica de los recubrimientos	28
4.1.2. Caracterización de los cordones.....	33
4.1.2.1. Microestructura de los cordones	37
4.1.2.2. Propiedades mecánicas de los cordones: dureza	38
4.1.3. Caracterización del recubrimiento	39

5. Resultados y discusión.....	40
5.1. Estudio de los parámetros de procesado láser	40
5.1.1. Geometría de los cordones	40
5.1.2. Microestructura de los cordones	49
5.1.3. Dureza de los cordones	60
6. Conclusiones.....	62
7. Bibliografía	64

Este trabajo de investigación se enfoca al estudio de la formación de cordones de Ti+B₄C como recubrimiento sobre aleación de titanio Ti6Al4V, mediante láser cladding y su análisis desde un punto de vista geométrico y microestructural. Con este enfoque se pretende establecer unas condiciones de funcionamiento o un mapa de proceso para realizar cordones y recubrimientos óptimos para su uso de alta resistencia a desgaste y temperatura.

Para ello se estudió por medio de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y pruebas mecánicas de microdurezas.

Aquest treball d'investigació s'ha enfocat a l'estudi de la formació de cordons de Ti+B4C com a recobriments sobre l'aliatge de titani Ti6Al4V, mitjançant la tècnica de *làser cladding* i el seu posterior anàlisi des d'un punt de vista geomètric i microestructural. Amb aquest enfocament es pretén establir unes condicions de funcionament o un mapa de procés per tal de poder realitzar o obtenir cordons i recobriments òptims per al seu ús d'alta resistència a desgast i temperatura.

Per poder portar a terme la investigació es feu ús d'equip de microscòpia òptica, electrònica i proves mecàniques de micra dureses.

Abstract

This minor thesis has been focused into the study of Ti+B₄C clads formation as a Ti6Al4V coating, using continuous Laser Cladding and it was studied both from geometrical characteristics and metallurgical points of view. This approach provides a path of process parameters in order to obtain optimum clads and coating with both good wear and thermal resistance.

Optical microscopy and Scanning electron microscopy, as well as mechanical tests such as micro hardness tests have been carried out.

Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer con mil y una gracias al tutor que me ha guiado durante esta tesina de investigación, el Dr Vicente Amigó Borrás. Su paciencia conmigo ha sido infinita y se lo agradezco enormemente.

Quiero agradecer también a todas aquellas personas que me han ayudado con este proyecto, desde Jennifer hasta Juan Carlos, en esas mañanas y/o tardes ayudándome en el laboratorio para *fabricar* las muestras. También quiero agradecer a Angélica Amigó, que también me ayudó a recordar cómo funcionaban las máquinas y animarme a acabar este trabajo.

Agradecer también a Montserrat, y sus tardes en el SEM, animándome a tomar el *pseudocontrol* del microscopio.

Y muchas gracias a todos los que no he nombrado...y por supuesto gracias a mi familia, porque siempre está ahí apoyándome en todos los momentos en que los necesito.

También quiero agradecer lo que este trabajo de investigación me ha brindado; la experiencia que conlleva realizar este tipo de trabajos de seguro que me servirán para mi futuro laboral.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación del trabajo

Como es sabido la industria aeronáutica es una de las ciencias que mayor demanda precisa en desarrollo de materiales. Actualmente los materiales compuestos se encuentran en un gran auge en investigación y desarrollo, pues son imprescindibles para la estructura de las aeronaves. No obstante sigue habiendo un gran interés en los metales para la fabricación de los motores, pues se trata de una aplicación donde los composites actuales no tienen aplicabilidad.

En los aerorreactores de los aviones tienen lugar procesos de combustión de muy alta temperatura y cuanto mayor sea ésta, mayor potencia útil se podrá extraer bien para sistemas auxiliares o bien para el empuje. Es pues en esta característica donde reside el actual desarrollo de materiales. La parte más crítica se encuentran en las zonas *calientes*. Es decir, en la cámara de combustión, turbina y tobera. Así mismo hay mayor interés en los álabes de la turbina de alta, pues es la que recibe el impacto de los gases más calientes. Además, debido a su compleja estructura, es difícil su diseño y construcción para que esté convenientemente refrigerado.

Hasta ahora estas partes se construían con el metal *Inconel 718*, aleación muy famosa y usada en los motores de aviación. No obstante es un metal pesado y cuya temperatura de funcionamiento no se adapta a la demanda actual. Aquí es pues donde entran en juego nuevos materiales. En concreto el titanio y sus aleaciones. Por sus excelentes características es el metal por excelencia que todos quieren incorporar a sus motores, ya que su densidad es baja, con alta resistencia a esfuerzos, a temperatura, etc.

Sin embargo, el titanio tiene un límite en cuanto a temperatura de funcionamiento. Es pues aquí donde puede empezar un nuevo desarrollo de material. Concretamente en la modificación superficial. Mediante una correcta y adecuada capa superficial se puede adquirir una perfecta barrera para la temperatura, tendiendo en material de base titanio y aleaciones, que seguirían manteniendo las características de peso, resistencia a esfuerzos, etc.

No obstante no es fácil crear una barrera con los adecuados componentes, estructuras, etc que esté bien adherida al material base. Aquí es donde se encuentra un método para crear esta capa con buena adherencia a la base y que se estudiarán sus resultados en el presente trabajo fin de máster. Se trata del *láser cladding*. Con este método se aporta un material cuyos elementos nos interesan aportar a la superficie de nuestro material y gracias a un aporte de energía puntual se puede combinar y reestructurar la superficie, obteniendo una perfecta adhesión y con modificaciones de la metalografía y microestructura.

Como este método parte de una aportación grande de energía simultáneamente con el material en forma de polvo, se pueden producir a nivel microscópico, microestructuras no deseadas que fragilicen o no sean propicias para las condiciones a las que se va a someter el material.

Por tanto en el presente proyecto se buscarán los parámetros idóneos del láser cladding, así como el aporte por minuto de polvos que favorecen la creación de estructuras favorables. Nuestro material base será el Titanio conocido como “aeronáutico”, el Ti-6Al-4V, es decir, aleación de titanio con aluminio y vanadio. Y como aporte de polvos, carburo de boro o B₄C. Con esto se buscan que se formen boruros de titanio sobretodo, muy resistentes a corrosión, desgaste y resistentes a altas temperaturas, además que no aportarían mucho peso extra. El trabajo se enfocará al estudio de la técnica de aporte de polvo y su influencia en la formación de microestructuras. Para futuros proyectos se podría ampliar al análisis de superficies completas, pues con esta técnica se consiguen cordones de material, así como estudios *in situ* de motores reales.

1.2. JUSTIFICACIÓN (PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA)

Como se ha comentado anteriormente, mediante el uso de la técnica de láser cladding se consigue combinar las propiedades de resistencia, rigidez y dureza del boro con las propiedades de densidad (peso), resistencia, tenacidad y tolerancia al daño del material base, el titanio. Así mismo se conseguirá aumentar la temperatura de funcionamiento.

Para poder crear estas estructuras de tipo cerámico como el TiC o compuestos metálicos de tipo TiB_x , sobretodo buscando la estructura TiB_2 , de muy alta dureza se necesitará partir de un polvo, el carburo de boro y mediante el láser cladding combinarlo con el material base. No obstante el efecto térmico del láser produce unas transformaciones fuera del equilibrio, por lo cual no pueden ser estudiadas mediante los diagramas de equilibrio. Como respuesta favorable, se produce un enfriamiento muy rápido que imposibilita la dilución del material, que no obstante, en el caso de la creación de superficies, que se consigue mediante varias pasadas, la pasada siguiente a un cordón aporta nueva energía al cordón anterior, permitiendo así dilución y posibles cambios en la estructura. Todo esto dependerá principalmente de los parámetros del láser (potencia, velocidad de barrido, cantidad de polvos aportados por minuto o flujo de polvos).

A todo esto hay que sumar que debido a que el material base posee aluminio y vanadio, estos también pueden interferir en la formación de nuevos compuestos no deseables.

La energía del láser se distribuye para calentar el sustrato, para fundir la capa de recubrimiento y parte que se refleja. Esto crea una zona afectada por el calor que conllevará consigo otra microestructura que también deberá ser estudiada, pues puede verse aumentado el tamaño de grano o bien cambios de fase.

Por todo lo expuesto es aceptable decir que la elaboración de este proyecto y estudio es pertinente, pues se podrá observar qué propiedades se conseguirán con determinados parámetros de láser, qué mejoras se pueden adquirir, así como una visión global del proceso, conociendo por tanto el proceso óptimo para llevar a cabo la modificación superficial cerámica deseable. Para ello se cuenta con la experiencia del departamento de materiales de la UPV, con una gran

experiencia tras de sí, así como de una técnica y recubrimiento cerámico con buenos resultados y mundialmente comprobado.

1.3. OBJETIVOS

Con todo lo expuesto se puede proceder a determinar los objetivos que se persiguen alcanzar con el presente proyecto.

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general o principal de esta investigación es explorar y observar la posibilidad de modificar las propiedades superficiales del Titanio mediante la formación de un compuesto superficial de Titanio y Titanio-Boro mayormente obtenido por la técnica de formación de recubrimiento de aporte de material por cordones o *láser cladding*.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para poder alcanzar el objetivo principal o general se necesitan cumplir unos objetivos específicos:

- 1) Determinar o establecer un cuadro que relacione el cambio de propiedades del recubrimiento al cambiar los parámetros del láser, que son la potencia energética y la velocidad de barrido.
- 2) Determinar qué tipo de microestructura se forma en el material de recubrimiento y en la ZAC o zona afectada por el calor una vez aplicado el láser.
- 3) Determinar de qué forma se transforma el material de adición en las condiciones de no equilibrio a las que se ve sometido.
- 4) Analizar el efecto del flujo de polvos de alimentación en el recubrimiento y en el material de sustrato.
- 5) Analizar la influencia de la cantidad de boro en las propiedades del recubrimiento.

2. ANTECEDENTES

2.1. Modificación superficial para aplicaciones de temperatura y desgaste

En los últimos años el Titanio, así como sus aleaciones, se han posicionado como el material por excelencia para aplicaciones con altos requerimientos de resistencia, con alta resistencia a alta temperatura y buen comportamiento a corrosión, todo ello con una densidad más baja que los materiales usados hasta entonces, que ha favorecido la entrada del titanio. Sin embargo, las aplicaciones que requieren todas estas características también demandan para ciertas aplicaciones una alta resistencia al desgaste y en el caso de la industria aeronáutica de forma específica también precisan de un requerimiento a temperatura mayor. Se ha de decir que el titanio posee buen comportamiento, pero la evolución de los aerorreactores y su aumento de potencia ha comportado un aumento de la temperatura de servicio e incluso el titanio se ha visto incapaz de seguir teniendo el mismo comportamiento a estas muy altas temperaturas.

Normalmente para poder cumplir con las nuevas demandas, la ingeniería de materiales ha tendido a la búsqueda y desarrollo de nuevos materiales. No obstante, en los últimos tiempos esta línea de investigación ha ido evolucionando en una solución más innovadora y de mayor rapidez de implantación en el mercado. En vez de buscar nuevos materiales o nuevas aleaciones que, no obstante, se sigue haciendo, emergió la idea de modificar los materiales ya existentes, mediante modificación superficial o mediante la implantación de multicapas con materiales compuestos y metales, etc.

En el caso de la mejora del metal para su aplicación en ambientes de alta temperatura y desgaste, la mejor solución es mediante la adición de una capa o recubrimiento en el material base. Con este método se consigue tener en el seno del material el metal base, con todas sus propiedades y en la superficie, los beneficios de otro material adherido. En el caso del titanio, objeto de este trabajo de investigación de fin de máster, se consigue disponer del núcleo formado por Titanio y sus aleaciones, cuyas propiedades de resistencia específica, tenacidad, etc soportará los esfuerzos aportando menor peso al conjunto; y en la superficie un recubrimiento óptimo para el uso previsto, como ambiente de alta temperatura, ambiente corrosivo, desgaste, etc.

La modificación superficial del titanio y sus aleaciones, mediante la formación de un recubrimiento duro es el tema que se ha abordado en esta investigación, relacionando el material añadido y el proceso usado para conseguir dicho recubrimiento.

El material base de polvos para crear el recubrimiento es el carburo de boro o B_4C , que mediante el proceso de *láser cladding*, se consigue crear el recubrimiento.

En investigaciones anteriores sobre adición de B_4C se encuentran pocas referencias, encontrando un número mayor de trabajos con materiales de adición con TiB_2 , como por ejemplo el trabajo de tesis doctoral de la Dra Irma Inirida, realizada en el mismo departamento en el cual se realiza este trabajo, el Departamento de ingeniería mecánica y de materiales, u otros trabajos con $TiB-TiC$ de Feng Shu-rong, o mediante WC , de J.A. Vreeling, en este caso por *láser de inyección*.

Todas estas investigaciones aportan un análisis de las relaciones entre las transformaciones del material añadido, las propiedades del recubrimiento y el efecto de las variables del láser; no obstante se tratan de investigaciones con diferentes tipos de material de aporte al recubrimiento y por tanto, es conveniente un estudio que cubra este nuevo tipo de recubrimiento. Además se ha considerado que el carburo de boro posee unas características favorables para la creación de compuestos superficiales óptimos, como es el TiB . En cuanto a este tipo de compuesto hay también investigaciones, sin embargo, no hay una línea de convergencia de resultados de las relaciones de los parámetros.

En los apartados siguientes se incluye la información referente a los fundamentos del láser cladding y características del compuesto TiB_2 que es el buscado con esta técnica, así como el efecto que producen los compuestos formados de TiC y TiO_2 . Se finalizará después con un pequeño análisis del carburo de boro y su justificación de uso en la presente investigación.

2.2. Láser cladding. TiB_2 . Efectos de los compuestos TiC y TiO_2

2.2.1. Proceso de Láser cladding

El Láser Cladding o recubrimiento láser tiene como objetivo producir una capa de un material sobre otro para formar una estrecha unión interfacial. La energía del láser funde el material de revestimiento formando una unión metalúrgica con el sustrato en forma de cordón (clad). La distribución de energía del proceso se puede dividir en un 2% que se destina a la evaporación del polvo, 9% es dispersada por el material de aporte, 50% reflejada en forma de calor mediante radiación, 10% invertido en la formación de plasma y el resto es aprovechado en el clad, siendo el 30% usado para fundir el sustrato. Algunas de las ventajas del láser cladding son: la alta deposición, baja dilución del sustrato y alta velocidad de enfriamiento, baja distorsión. Con este método se pueden conseguir espesores desde 50 micrómetros en una capa hasta 2mm con proceso multicapa.

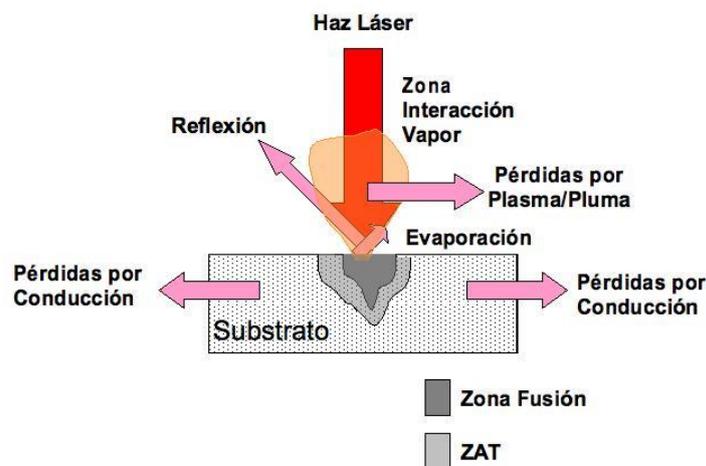


Ilustración 1 Balance energético del proceso de láser cladding. (ZAT o ZAC=zona afectada térmicamente o por el calor)

Existen tres formas de llevar a cabo este proceso: en primer lugar, polvos precolocados, en el cual el material de recubrimiento es aplicado en solución acuosa. Su ventana de operación es estrecha, pues requiere mucho tiempo y existe dificultad de aplicación cuando se tienen geometrías complicadas. En segundo lugar, el material de recubrimiento es una combinación de polvos y alambre que se alimenta al baño fundido. Es un proceso de difícil control que deja alta tasa de dilución. En tercer y último lugar está el láser cladding por soplado de polvos, en el cual un gas se sopla y arrastra consigo un flujo de polvos

bajo el láser, mientras se realiza el barrido por la superficie del material, generando a su paso un baño fundido donde se deposita y funde el material de recubrimiento, formando el clad. La preparación de la pieza antes del proceso no requiere de gran trabajo y la geometría de la pieza puede ser compleja, cosa que facilita el proceso para piezas de muy alta complejidad usadas en la aeronáutica, como son los álabes de turbina.



Ilustración 2 Modificación superficial mediante Láser cladding sobre álabes turbina

Además podemos encontrar en este tercer tipo de alimentación de polvos dos subtipos: de forma lateral o coaxial. Siendo este último tipo capaz de crear cordones independientes de la dirección de movimiento de la pieza de trabajo, ventaja añadida para la fabricación/reparación de piezas 3D.

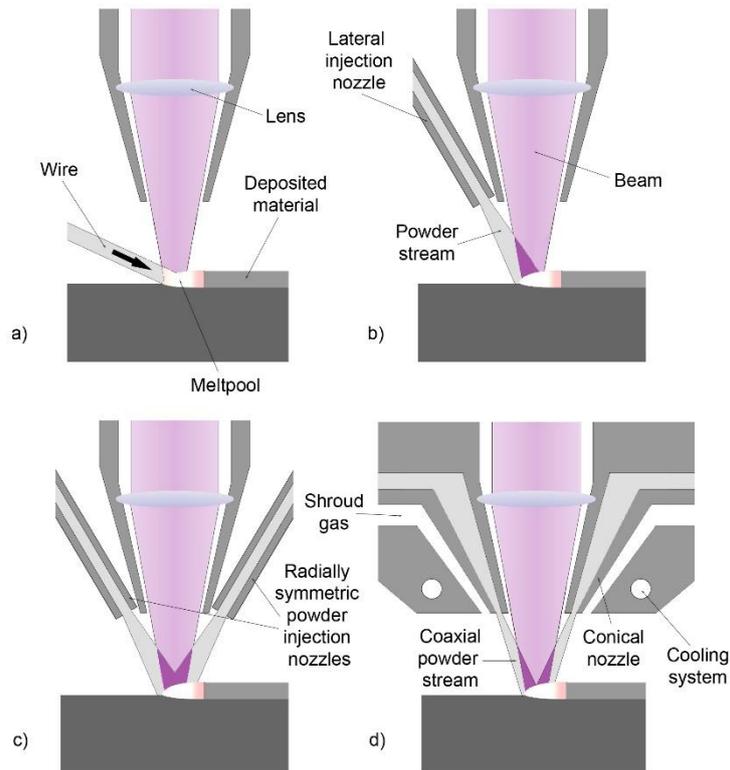


Ilustración 3 Tipos de métodos de aplicación de láser cladding. a) Alimentación material recubrimiento por hilo, b) Alimentación de polvos lateral, c) Alimentación polvos bilateral, d) Alimentación polvos coaxial

El láser cladding ha ido tomando importancia a lo largo de su vida, pues en un principio sólo era usado para modificación y tratamiento superficial, pero que con el tiempo se ha podido implementar para generar partes enteras, que puede verse parecido al proceso de pulvimetalurgia de sintering o comúnmente conocido como impresión 3D, reconstruir zonas desgastadas o adicionar capas a ciertas partes específicas a un objeto, parte, etc.

La técnica de fabricación 3D del láser cladding o DLF (Direct Laser Fabrication) permite crear piezas en tres dimensiones y complejas, con la ventaja de poder añadir varias capas con diferentes polvos, pudiendo obtener capas de diferentes composición o incluso poder controlar la composición transversal del cordón de forma más precisa.

Los compuestos de matriz metálica basados en boro como refuerzo de la matriz de titanio, como es el caso objeto de esta investigación, se depositan en forma

de carburo de boro, donde existen gran cantidad de precipitados debido a la rápida solidificación y precipitados nanométricos por la sobresaturación de boro.

2.2.2. Parámetros básicos del proceso de láser cladding

La ventana de operación para el proceso de láser cladding es definida principalmente por la potencia del láser P (Wattios, W), velocidad de barrido del haz V (m/s) y el flujo de polvos F (mg/s), [de Oliveira et al, 2004]

No obstante, otros parámetros pueden resultar influyentes, como el tamaño del foco del haz, la distribución de energía del haz, tipo de gas de arrastre y flujo, tipo de gas de protección y flujo, velocidad y dirección de alimentación de las partículas. No obstante, debido a que se dispone de un tipo de inyector-tobera de láser cladding sólo se puede estudiar mediante la variación de parámetros de potencia, velocidad de barrido y flujo de polvos. Se podría hacer un estudio más profundo teniendo en cuenta los demás parámetros para poder obtener la mejor distribución de parámetros, cosa que queda fuera del alcance de esta investigación.

Los parámetros deberán ser tales que se consigue una unión óptima, de un espesor determinado, adecuada densidad y ausencia de grietas. Con ello se conseguirá una óptima capa de recubrimiento.

En 2004 ya se realizó un estudio de la influencia de dichos parámetros de trabajo del láser *cladding* con las diferentes geometrías obtenidas en el cordón. [de Oliveira et al, 2004]. En este trabajo se compararán los resultados obtenidos con los resultados publicados en dicho artículo.

2.2.3. Compuestos de Titanio y Boro. TiB_x . Efectos TiC y TiO_x

Los compuestos creados por la adición de polvos cerámicos que se integran en el titanio, formando TiB_x , por ejemplo, pueden presentar características de material compuesto, que se puede definir como un material con combinaciones de dos o más materiales distintos con una superficie identificable entre ellos, que mediante su interacción se consiguen las propiedades de ambos, resultando en un material superior que los dos materiales por separado. Se podría decir que el Titanio y TiB_2 se compenetrarían, pues existiría una frontera entre estos dos compuestos, haciendo que se comportan como un *composite*.

Este tipo de materiales se conocen como TMC o titanium matrix composite, cuya matriz o material base es el titanio y el refuerzo sería el TiB_x . Con ello se consiguen unas propiedades excelentes, gracias al titanio y un comportamiento frente a la temperatura de servicio muy bueno, manteniendo un comportamiento isotrópico.

Con el refuerzo de TiB_x se consigue una mejora de las propiedades mecánicas por poseer este cerámico de una temperatura de fusión muy alta de $3225^{\circ}C$, una alta dureza de entre 20GPa y 33GPa, una buena conductividad eléctrica y muy buena estabilidad química, así como la propiedad de poder generar capas adherentes continuas y uniformes.

La estructura del TiB_2 , es de forma hexagonal, con comportamiento tanto metálico como cerámico, por ser conductor eléctrico, tener un alto módulo elástico de algo más 550GPa (algo más de la mitad del módulo del grafeno), alta resistencia específica y resistencia al desgaste gracias a sus fuertes enlaces covalentes entre los átomos de boro. Su densidad es de $4520kg/m^3$. Algunas de sus aplicaciones principales son blindajes, herramientas de corte, electrodos o recubrimientos resistentes al desgaste, etc.

En cuanto al TiC o carburo de titanio, se puede decir que su formación en cualquier compuesto aporta alta dureza, pues es uno de los carburos más duros, llegando hasta los 32 GPa, que provee también, como el TiB_2 de gran resistencia al desgaste. No obstante, con altas energías puede disolverse el TiC y formar dendritas. Su densidad es algo mayor que la de TiB_2 , $4920kg/m^3$. Es también

buen conductor de la corriente eléctrica, con un punto de fusión de 3140°C. Es un compuesto muy frágil que además puede reaccionar con nitrógeno si se presenta atmósfera inerte, formando nitruro de titanio. Su principal uso es para herramientas de corte.

Por último, en relación con el TiO, u óxido de titanio es un compuesto peligroso bajo condiciones de luz ultravioleta por ser tóxico, que no obstante es inactivo químicamente ni puede ser atacado por ácidos. Su temperatura de fusión es bastante más bajas que los compuestos anteriores, de 1830°C, con densidad parecida (4200kg/m³). Se presentan en forma esférica.

2.3. Justificación del uso del compuesto B_xC.

Después de haber visto los compuestos deseables en la formación de cerámicos con el titanio, que son principalmente el TiB₂ y también, aunque en menor medida el TiC, una forma de conseguir estos compuestos para un recubrimiento mediante láser cladding es el carburo de boro. Con la alta energía del láser se consigue disociar el carburo de boro, cuyos átomos de boro se difunden y se juntan con el titanio de la zona de dilución formando compuestos de “blocked particles” de TiB₂. Además por la alta energía, se forman dendritas de TiC y por último whiskers de TiB. Los dos primeros compuestos son los más deseables en esta estructura compleja que se forma, pues para ello se realiza este recubrimiento. El TiB₂ y el TiC aportan gran dureza y gran resistencia a la temperatura. Además el TiB₂ es altamente estable, asegurando una buena cantidad de este compuesto en el recubrimiento y permaneciendo inalterable bajo condiciones de corrosión a alta temperatura, que es una importante cualidad buscada en turbinas de aerorreactores, por ejemplo. Con este compuesto se obtiene una estructura tremendamente compleja, que se estudiará después para cada cordón. Se pueden formar también compuestos de B_xC o carburo de boro, que también son muy duros, aunque menos deseables que el TiB₂, pues éste tiene buena tenacidad y une los dos mundos de forma eficiente, el de los metales y el de los cerámicos.

Como se usa láser cladding con atmosfera controlada, es muy improbable que se formen óxidos de titanio o TiO_x, pues no hay presencia de oxígeno en la zona

de fusión durante la pasada del láser, no obstante se ha de asegurar la atmósfera, pues este compuesto debilitaría el recubrimiento, por tener forma esférica y ser concentradores de tensiones, pudiendo incluso empezar grietas por cavitación.

Como resumen de todo lo expuesto anteriormente, se podría sintetizar que con el uso del láser cladding se pueden suceder varias capas de recubrimiento, con una composición gradual de fases duras y más blandas, que aumentarían las propiedades superficiales manteniendo las buenas características del material base, como es el titanio y aleaciones en este caso, con la consiguiente disminución de grietas y de poros en los recubrimientos.

No obstante, este proceso conlleva unas microestructuras muy complejas que deben ser estudiadas, para poder esclarecer y obtener unas relaciones de parámetros lo más óptima posible para producir los compuestos deseados. Es pues, que los parámetros del procesado tienen una influencia fundamental en las dimensiones y forma del cordón, así como en la formación de la microestructura. Por eso, para conseguir obtener buenos recubrimientos de titanio es crucial optimizar el proceso, ya que las aleaciones de titanio tienen tres peculiaridades que obligan a un estricto control:

- El titanio posee una elevada reactividad cuando se funde con elementos de la atmósfera, reaccionando fácilmente con Nitrógeno, Oxígeno y vapor de agua. Por eso se deberá controlar la atmósfera, tal como se ha comentado con anterioridad.
- Es fundamental optimizar el proceso y maximizar la productividad para que sea rentable el uso del láser cladding. La velocidad de recubrimiento o de avance deberá ser tal que resulte rentable, pues el haz láser es muy pequeño.
- Se debe controlar la pérdida de material y ajustar de manera eficiente las dimensiones, pues el titanio es un metal de alto coste.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado acerca de la técnica de laser cladding, las líneas de investigación más importantes a nivel mundial en la modificación superficial del titanio y la problemática asociada a la combinación titanio

procesado por láser. En este trabajo se intentará dar un primer paso hacia la comprensión del procesado por láser y su relación con la formación de la microestructura. Para ello, se simplificarán las variables que hacen relación al material y se centrará la investigación hacia las variables de procesado.

Una vez obtenidas las condiciones óptimas que definen la ventana de procesado del titanio, se estará en condiciones de desarrollar nuevas aleaciones y compuestos en la fase de tesis doctoral.

3. Planificación de la investigación

Para poder llevar a cabo la investigación, es necesario realizar una buena planificación del trabajo a realizar. Por eso se describen a continuación las fases seguidas para la realización de la investigación.

Fases

- 1) Planificación
 - a. Documentación bibliográfica del procesado por láser cladding
 - b. Definición y obtención de materiales y muestras y definición equipos
- 2) Caracterización
 - a. Preparación metalográfica
 - b. Microscopia óptica y análisis geométrico
 - c. Determinación de la microestructura
 - d. Microscopia electrónica. Microestructura detallada y EDS
 - e. (Barridos microdureza. Pruebas desgaste)
- 3) Discusión, resultados y redacción trabajo
 - a. Obtención de las variables empíricas de proceso y medidas geométricas
 - b. Relación entre geometría cordón y formación de la microestructura
 - c. Influencia sobre la dureza
 - d. Determinación de presencia de contaminantes o defectos

3.1. Fase I: Planificación

- a. Documentación bibliográfica

La fase de planificación conlleva toda la preparación previa al análisis y experimentación. Es una fase que conlleva un gran trabajo investigador de fuentes ya existentes para poder entender qué se tiene de materiales, qué puede esperarse, qué existe actualmente, el estado del arte, etc. Con la fase de documentación se ha buscado e investigado en trabajos anteriores existentes todo aquello relacionado con el proceso de modificación de superficies mediante

la adhesión de polvos metálicos/cerámicos con la técnica de láser cladding. Se enfocó la búsqueda de la modificación superficial con material base titanio o bien titanio aleado con aluminio y vanadio, para tener unas referencias lo más parecido posible al trabajo actual, aunque también se han buscado fuentes de otros materiales para la comprensión del proceso del láser cladding.

b. Definición y obtención de materiales y muestras y definición equipos

Materiales

Para la preparación de las muestras se contó con la empresa AIDO, cerrada en la actualidad. Dicha preparación tuvo lugar hace unos años, por lo que las muestras no se hicieron de forma *ex professo* para este trabajo de investigación. Es por ello que se disponen de datos limitados sobre las condiciones de proceso, morfología del polvo, composición exacta del material sustrato, etc. Sí se disponen de los parámetros del láser con los que se realizó cada cordón, así como el flujo de polvos del recubrimiento, que se mostrarán más adelante.

Como sustrato metálico de las muestras se usó chapa de Titanio comúnmente usado en la aeronáutica, el Ti-6Al-4V. Su procedencia se desconoce, pues fue AIDO quien proporcionó ya las muestras con los cordones hechos y no puede saberse qué empresa proporcionó el titanio ni qué características tiene, que no obstante, a efectos de la investigación no hay trascendencia en desconocer características elásticas, etc, pues se analizará la microestructura de la zona de dilución del cordón.

Respecto a los polvos para el recubrimiento, se trata de una mezcla de Titanio (TLS) y polvo de B4C procedente de Alpha Aesar, ambos polvos con granos esféricos, de un tamaño de partícula de 25-53 micras para el carburo de boro. Se mezcló un 20% en peso del polvo de B4C con Titanio en polvo en una turbula durante una hora. Posteriormente AIDO preparó la plantilla con cordones en dos caudales de polvo diferentes, a 3 y 5 g/min.

Como se ha comentado no se dispone de mayor información en cuanto a la composición exacta de los materiales empleados.

Se presentan a continuación los diagramas de fases del titanio con los elementos del Ti64 y para la formación de los boruros de titanio.

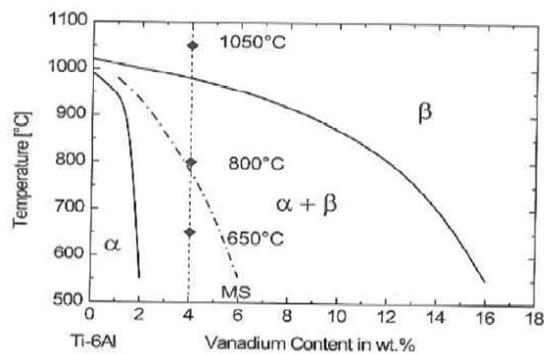


Ilustración 4 Diagrama de fase Titanio-6Al-V

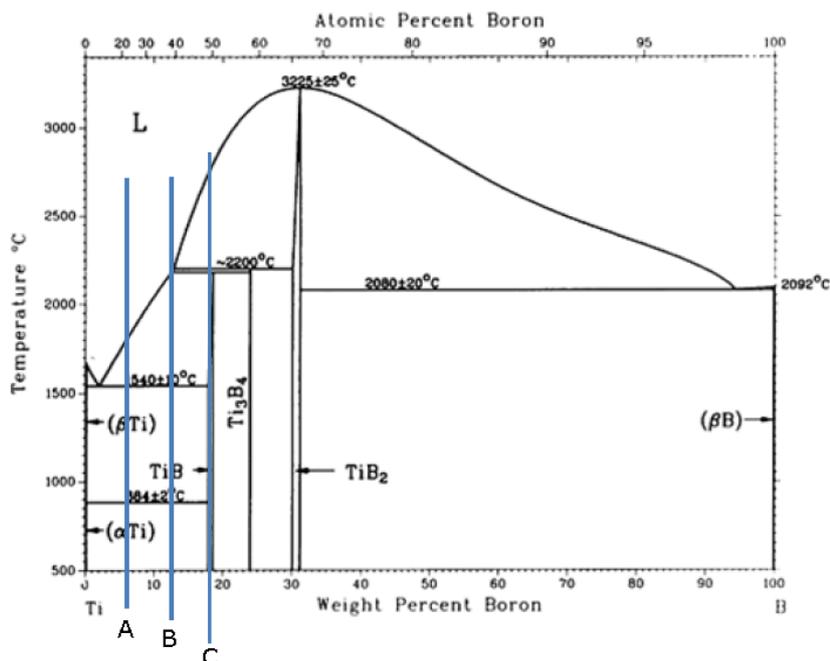


Figura 2.6 Diagrama de fase Ti-B: aleación A 6,2%B (20%TiB₂), aleación B 12,5%B (40%TiB₂) aleación C 18,7%B (60%TiB₂) [27].

Ilustración 5 Diagrama de fase del titanio -boro. Imagen sacada de la tesis doctoral de la Dra. Irma Inirada Angarita Moncaleano

Formación de cordones/recubrimiento por láser cladding

No se dispone de información sobre el tipo/marca de láser usado ni la atmósfera protectora, así como la potencia máxima del láser. Sí se sabe que el láser recibía alimentación de los polvos de forma coaxial, para evitar problemas con la dirección de movimiento del láser o de la pieza y el polvo suministrado.

Estudio de los parámetros de procesado láser

De AIDO se obtuvo una muestra con 18 cordones que se obtuvieron para un caudal de 3 g/min de polvos y 18 cordones con un caudal de 5 g/min de polvos. Así mismo se obtuvo un recubrimiento a partir de solapamientos de cordones con unos parámetros fijos de flujo de polvos, velocidad de avance y potencia. En cuanto al flujo de alimentación de polvos de Titanio+carburo de boro, se corresponde a 3 g/min, a una velocidad de avance de 600mm/min. El parámetro de potencia no fue dado, aunque por el análisis de la geometría, dilución en material base y como se podrá ver en el análisis geométrico, se puede deducir que la potencia de láser se encuentra entre 600 y 900 W. En el capítulo del análisis geométrico se procederá a discernir el valor de potencia real conforme a una comparación con respecto a los cordones.

En cuanto a los cordones, existen 3 variables que se ven involucradas en el proceso de formación del cordón: flujo de polvos en gramos por minuto (F), velocidad de avance, en milímetros por minuto (V) y en potencia del láser, en Wattios (P).

Según una tabla que proporcionó AIDO y según proporciona la tabla de operación, usó 6 niveles de potencia y 3 niveles de velocidades, para cada parámetro de flujo. Es decir, $6 \times 3 \times 2$, que son 32 cordones en total.

Los parámetros de potencia y velocidad se mantendrán con la misma distribución tanto para los cordones realizados con un flujo de 3 g/min como para 5g/min.

Los cordones tendrán una nomenclatura del 1 al 18, siendo el 1 el cordón realizado con una menor potencia y menor velocidad y 18 el cordón con mayor potencia de láser y mayor velocidad de avance.

Para los cordones 1-6 (ambos inclusive) se realizaron con la misma velocidad de avance, 400 mm/min, viéndose incrementando la potencia del láser, desde los 500W hasta los 1000W. Los cordones 7-12 (inclusive) se realizaron con una velocidad de avance de 600 mm/min, variando la potencia de 500 a 1000W. Finalmente los cordones 13-18 (inclusive) se realizaron con una velocidad de avance de 800 mm/min con el barrido de potencias de 500 a 1000W.

De esta forma se consigue un barrido con todos los parámetros y todas las combinaciones posibles para las potencias y velocidades dadas. Se sobreentiende o se puede decir que para menores velocidades podría no conseguirse resultados esperados o bien con demasiadas diluciones, etc, igual como con menores potencias del láser. No obstante no se puede afirmar en este asunto nada, pues no se tiene más información que la ya expresada.

Se detalla a continuación una tabla con los cordones y los parámetros del láser para cada uno de ellos. Nótese que sólo se procede a mostrar una tabla resumen de los parámetros para 18 cordones, pues para los otros 18 son exactamente iguales sólo que variando el flujo de polvos de alimentación.

Nº de Cordón	V (mm/min)	P (W)
1	400	500
2	400	600
3	400	700
4	400	800
5	400	900
6	400	1000
7	600	500
8	600	600
9	600	700
10	600	800
11	600	900
12	600	1000
13	800	500
14	800	600
15	800	700
16	800	800
17	800	900
18	800	1000

Tabla 1 Mapa parámetros procesado láser cordones

La nomenclatura que se seguirá para designar los cordones será {#X.Y}, siendo el símbolo # la correspondencia con “número de cordón”, la letra “X” vendrá sustituida por el número 1 al 18, designando el número de cordón según la tabla anterior y la letra “Y” recibirá el valor de 1 ó 2 según corresponda con un cordón cuyo parámetro de flujo de polvo sea de 3 g/min, en tal caso será el “1” o si el flujo es de 5g/min, cuyo número será el “2”.

Para esclarecer la nomenclatura, se expone un pequeño ejemplo, para referirse al cordón que se procesó a una velocidad de 600 mm/min, con una potencia de

1000W, con un flujo de polvos de 3 gr/min, se designará como {#12.1}. Si fuese el mismo cordón, pero con un flujo de 5 gr/min, sería {#12.2}.

4. Desarrollo experimental

En este apartado se detallarán los equipos y métodos usado para el desarrollo experimental de la investigación que se ha llevado a cabo. Se pretende reunir en este capítulo todo aquello relacionado con la preparación de las muestras, así como el equipo utilizado y también el procedimiento de experimentación llevado a cabo. Se procederá a ir explicando y desarrollando de forma secuencial el trabajo realizado.

Para la investigación no se tuvo control sobre los materiales con los que se hicieron las muestras y se recibió directamente la plantilla de cordones ya hecha. Por tal motivo se procede a relatar directamente la caracterización microestructural de las muestras.

4.1 Caracterización microestructural

Para la caracterización de los cordones y recubrimiento obtenidos, se han empleado una serie de técnicas y equipos, aplicadas de forma secuencial para llevar a cabo la identificación de la microestructura.

4.1.1 Preparación metalográfica de los recubrimientos

1) Corte

A partir de los cordones obtenidos mediante láser, se prepararon muestras para su observación y análisis en microscopia, tanto óptica como electrónica. Se hicieron tantas muestras como cordones había (36 en total), así como una muestra para estudiar el recubrimiento. El primer paso para la obtención de estas muestras es el corte de las mismas. Éste se realizó de forma transversal al cordón, mediante una cortadora manual o tronzadora, utilizando un disco de corte abrasivo de carburo de dureza alta para materiales de alta dureza, con una velocidad de trabajo lenta y con refrigeración para poder permitir un buen corte del titanio y del recubrimiento de alta dureza.



Ilustración 6 Tronzadora manual

2) Embutido

Posteriormente al corte de los cordones y recubrimiento se procedió a su embutido en resina de metacrilato, mediante el empleo de una embutidora en caliente marca Struers modelo LaboPress-3, con parámetros de 20kN de presión, 8 minutos de calentamiento y 8 minutos de enfriamiento. El diámetro de la probeta para los cordones es de 25 mm y para el caso del recubrimiento, al ser más grande de tamaño se realizó en 35 mm. En este caso se recurrió a otro equipo de embutido de carácter manual, marca Metaserv (mounting press).



Ilustración 7 Embutidora caliente-fría izda y embutidora manual dcha

3) Desbaste

Para el proceso de desbaste y pulido se procedió a un primer de desbaste grueso con papel de lijas de carburo de silicio de número 500 (tamaño de la partícula de

23µm) durante 1 minuto y posteriormente con una lija del mismo material de partícula número 1000 (o bien 10µm de tamaño de partícula) durante otro minuto. Primero se posiciona el disco de desbaste sobre el equipo Struers, LaboPol-21, disco de 500 en un lado y el de 1000 en el otro. Se aplica agua de forma continua para poder tener una ligera lubricación y se posiciona con una ligera aplicación de presión a la muestra para su desbaste. Las revoluciones usadas son de 300rpm. Después del desbaste con el disco 1000 se realizó una inspección visual de las muestras, apreciándose unas rallas, debido seguramente a desprendimientos de partículas de carburo de boro y rallando el metacrilato o incluso la muestra.

Se procede después a su desbaste fino para intentar eliminar dichas rallas, con el equipo Struers LaboPol-5 con un disco de tipo MD-Largo con suspensión de diamante de 9 µm con unos tiempos de 6 a 10min a unas 150 rpm. La fuerza aplicada sobre la probeta es baja. Para el pulido final se usó disco de pulido de tipo MD-Chem con una mezcla de sílice coloidal de 0.05 µm (OPS) y de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) con una relación del 10% del total. Antes de trabajar con el paño OPS se procedió a una lubricación con agua destilada. El pulido es automática, que no obstante debe aplicarse manualmente la mezcla de sílice coloidal y peróxido, humedeciendo el disco sin que llegue a quedar seco. Cuando se acabó la mezcla se procedió a limpiar el disco con agua destilada, aproximadamente 500ml para que disco y muestra quedaran limpias sin restos del sílice, pues si se seca se endurece y entorpece la inspección microscópica.

Luego del pulido con los paños y la mezcla de sílice coloidal, se procedió a una limpieza de las muestras con agua y jabón, seguido de agua destilada para acabar finalmente con limpieza de alcohol y secado con secador eléctrico para evitar huellas que dificulten la observación.

Después del pulido se pudo apreciar que no había restos importantes que dificulten la caracterización de la pieza de rayas por las partículas desprendidas de carburo de boro. Sí se observaron algunas rallas, aunque en zona de sustrato y en zona no relevante. Tampoco se apreciaron en todas las muestras, sólo que en algunas y para evitar que se produjeran nuevos desprendimientos de partículas y viendo que no afectaban las visualizadas, se eligió por dar por bueno el proceso de pulido. Para el caso de la muestra de recubrimiento, se procedió

al mismo procedimiento con los mismos discos y mezcla de sílice coloidal y peróxido de hidrógeno, pero usando el equipo de desbaste manual, pues la muestra es demasiado grande para su colocación en la pulidora automática.



Ilustración 8 Equipo de Pulido



Ilustración 9 Proceso de pulido

Normalmente habría un paso de ataque químico a la pieza para poder distinguir la zona afectada por el calor, etc. No obstante, no se vio necesario dicho ataque, pues la zona de dilución del recubrimiento en el sustrato se veía a simple vista.

4) Análisis metalográfico

Para el análisis metalográfico se usó el Microscopio óptico Nikon LV-100 Series con iluminación de campo claro, oscuro, luz polarizada y contraste interferencial, mesa electrónica y cambio de lente automático, con objetivos de 50x, 100x, 200x, 500x y 1000x y con analizador de imágenes Nikon NIS-Elements AR™, para analizar la microestructura, análisis de imagen, medición de las muestras, etc. ubicado en el Instituto de Tecnología de Materiales de la UPV, en la Ciudad Politécnica de la Innovación.



Ilustración 10 Microscopio óptico Nikon ITM y Lupa, DIMM

Para un análisis de mayor resolución, así como para poder realizar análisis de energías dispersivas de rayos X (EDS) con el cual se podrá conocer la composición del material y observar así qué compuestos se forman, se usó un microscopio electrónico de barrido (MEB o SEM en inglés) modelo JEOL JSM 6300 equipado con sonda de análisis de EDS *Link*, de Oxford Instruments. Es necesario realizar un puente conductor a las muestras, pues se encuentran embutidas en material no conductor. Para ello se realizó un metalizado superficial (recubrimiento) con Oro. Se ha de decir que se intentó usar recubrimiento de carbono, también conductor, pero no se podía observar bien la muestra y, por tanto, se optó por el metalizado en oro, que sí permitía una observabilidad óptima de la muestra.

Los parámetros de funcionamiento del MEB son de 20kV y 15 mm de distancia a la muestra.

Se realizaron en los cordones que presentaban mayor interés un estudio con el microscopio electrónico, realizando EDS en los puntos que presentaban un mayor interés.



Ilustración 11 Microscopio electrónico de barrido

4.1.2. Caracterización de los cordones

Para la caracterización de los cordones se empezó con el análisis o caracterización geométrico-dimensional. Después se realiza la caracterización microestructural, para acabar con un análisis de las propiedades mecánicas de dureza.

Como se ha comentado anteriormente, de las plantillas de cordones, se procedió a su corte transversal, embutido y pulido.



Ilustración 12 Plantillas cordones y recubrimiento



Ilustración 13 Muestras ya embutidas. A la derecha se pueden ver con recubrimiento de oro para el SEM

Una vez obtenidas todas las muestras, con los 18 cordones a un flujo de 3 g/min, puestos de 6 en 6 cordones por muestra (cordones #1/#6, #7/#12, #13/#18), y 3 muestras más para los 18 cordones a un flujo de polvos de 5 g/min, se procedió a la medición de los cordones de forma individual mediante el microscopio óptico Nikon, a bajos aumentos, de 50x y analizados posteriormente con el software Nikon NIS-Elements para determinar las dimensiones geométricas.

A continuación, se pueden ver unos ejemplos de los cordones obtenidos:

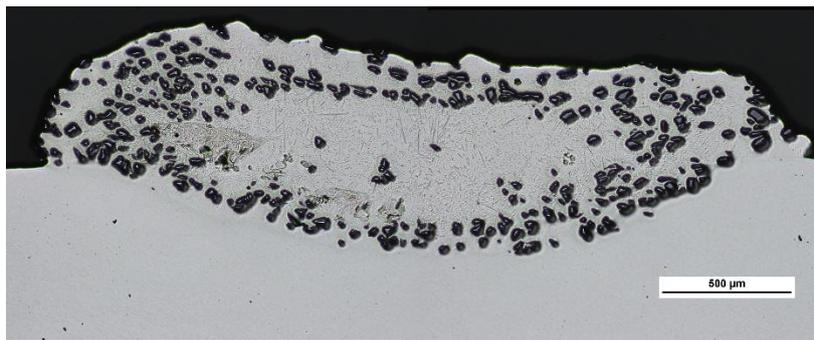


Ilustración 14 Cordón #1.1

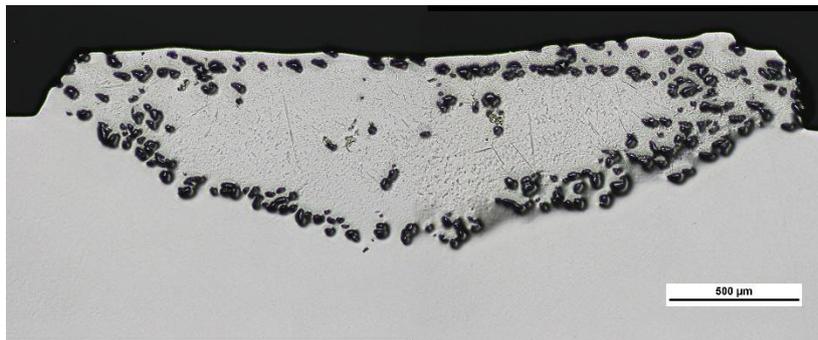


Ilustración 15 Cordón #11.1

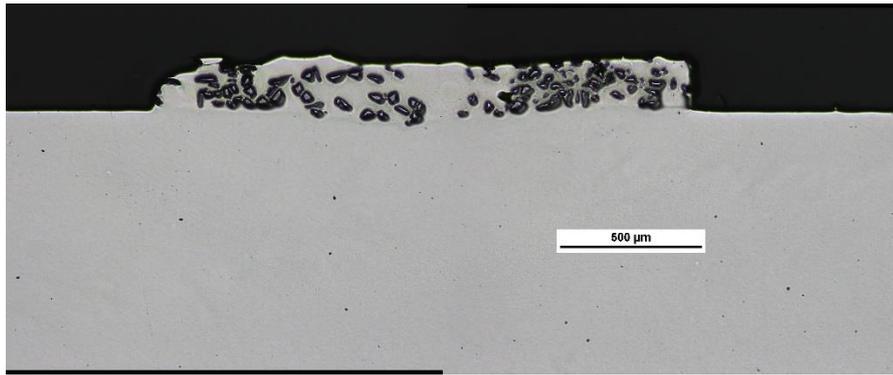


Ilustración 16 Cordón #13.1

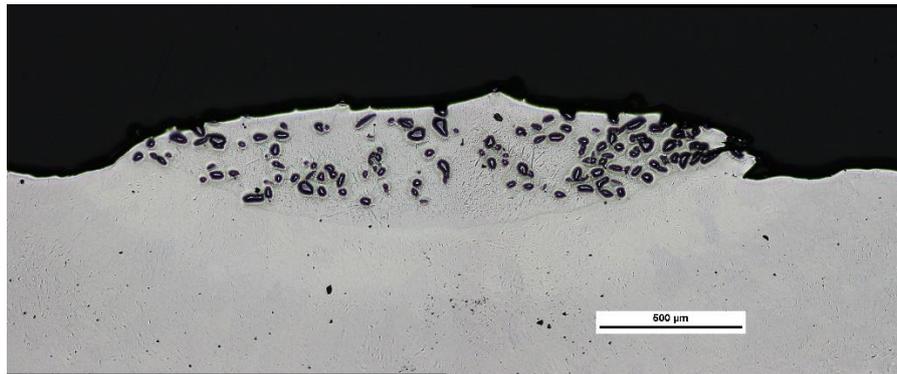


Ilustración 17 Cordón #15.2

Como se puede observar en las imágenes de cordones anteriores, se manifiesta en ellos unas diferencias notables. Estas variaciones de geometría son causadas por el efecto de los parámetros del láser. Es necesario, por tanto, realizar un estudio de la influencia de dichos parámetros con la geometría del cordón y poder establecer así una relación para poder predecir geometrías futuras y adaptarlas a las necesidades. En este contexto los autores *de Oliveira* ya marcaron la interrelación entre dichos parámetros y las dimensiones del cordón, y como se puede ver desde un primer vistazo que sí hay una variación. Por tanto se puede concluir que existen muchas morfologías, una por cada variación de parámetro. Se precisará de seguir la evolución de las dimensiones de cada cordón.

Para poder establecer dichas relaciones, muchos autores propusieron ya formas de medir las dimensiones del cordón y relacionarlos más tarde con los parámetros del procesado. En el mismo estudio de *de Oliveira* o [Hussam El Cheikhse, et al, 2011] entre otros establecieron diferentes formas de dimensionar el cordón, mediante por ejemplo la anchura del cordón, altura del cordón, altura de la zona de dilución, anchura de la zona de dilución y áreas del cordón y zona dilución.

En otros estudios también se trabaja con dimensiones por la zona afectada por el calor, que no obstante no se verá estudiada en la presente investigación.

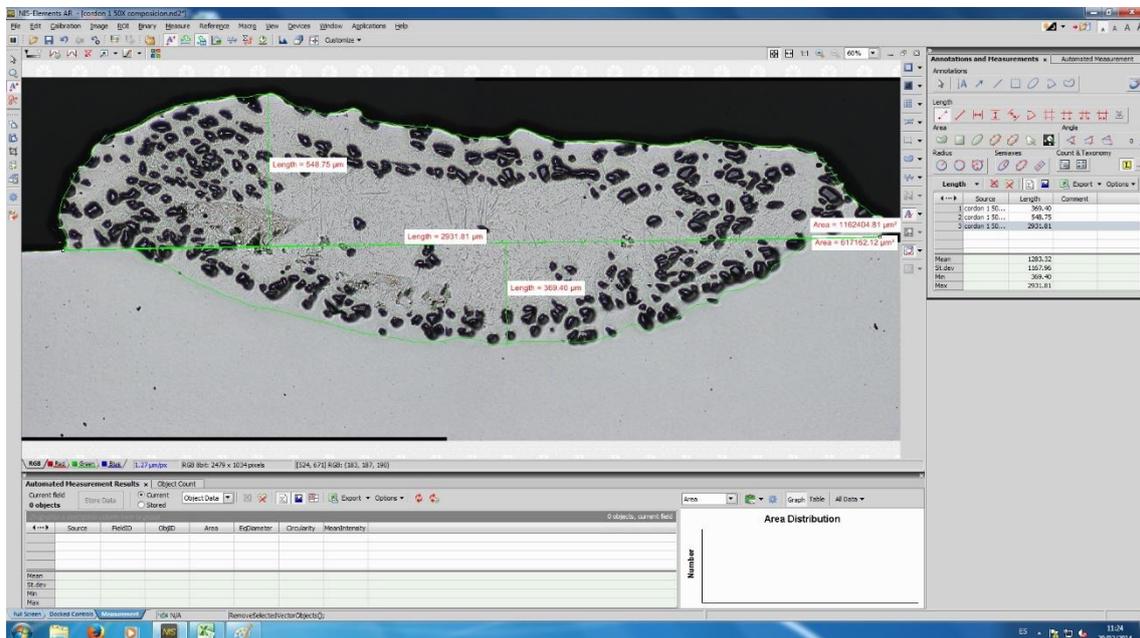


Ilustración 18 Análisis geométrico cordón mediante el software NIS-Elements de Nikon

Se procedió a medir los parámetros siguientes:

Hc=Altura del cordón o clad

Wz=Anchura del cordón o clad

Hd=Altura zona dilución cordón/metal sustrato

Ac=Área del cordón o clad

Ad=Área de dilución.

La herramienta usada para las mediciones es el software Nikon NIS-Elements, que de una forma fácil y casi intuitiva permite medir las longitudes, áreas, etc.

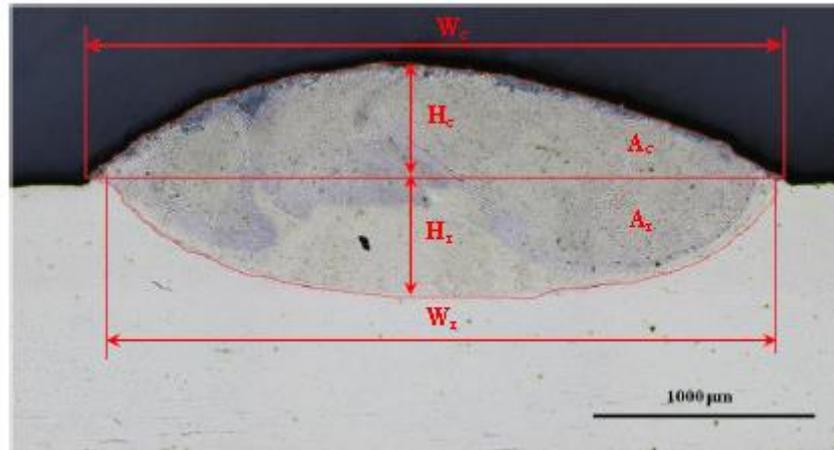


Ilustración 19 Parámetros del cordón

4.1.2.1. Microestructura de los cordones

Primero se realiza una inspección visual de los cordones mediante microscopía óptica o incluso con una lupa o microscopio de bajos aumentos, para determinar que efectivamente se ha obtenido un cordón. Así mismo se procede a observar si se aprecian grandes defectos, como poros grandes, rebabas, grietas, etc. Con microscopía óptica no se aprecian defectos que puedan servir para poder determinar que un cordón no es apto. Posteriormente se observó con SEM que existen algunos microporos de forma muy específica en algún cordón concreto, que no obstante, no impide tampoco determinar que un cordón debe ser desechado.

Después de la inspección visual se tomaron imágenes de toda la sección transversal mediante el microscopio óptico, pudiendo ver de esta forma las estructuras características del recubrimiento, zona intermedia y zona inferior de la dilución de cordón en material base. Así mismo se realizaron las mediciones con el software específico para extraer las dimensiones.

Después de estos dos pasos se procedió a la toma de imágenes mediante microscopía electrónica de barrida, haciendo electrodispersión de rayos X en zonas consideradas *interesantes* por tener alguna estructura de interés y saber por consiguiente qué elementos existen y poder determinar por la forma de qué compuesto pudiere tratarse. Ha de decirse que no se contó con un patrón de

análisis determinado, pero si se realizaron patrones a lo largo vertical del cordón y/o transversal para determinar varias zonas, así como en algunos cordones se analizaron con una pequeña área para tener unas características medias y en otros puntos mediante análisis de línea, para poder determinar en su caso la disolución del carburo de boro, por ejemplo.

4.1.2.2. Propiedades mecánicas de los cordones: dureza

Se realizaron unos ensayos de microdureza Vickers, en varios puntos de los cordones, con cargas de 300g de fuerza, mediante el microdurómetro Innovatest 400 A Series.



Ilustración 20 Microdurómetro

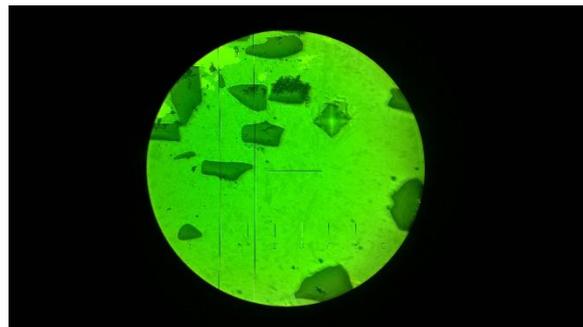


Ilustración 21 Medición microdureza. Obsérvese el rombo/pirámide que deja impresa la punta del microdurómetro

4.1.3. Caracterización del recubrimiento

Como el recubrimiento y tal como se ha comentado anteriormente, venía ya hecho, se procedió a intentar relacionar y seleccionar qué cordón es representativo y por tanto establecer los parámetros que corresponden al recubrimiento.

5. Resultados y discusión

En este apartado se incluyen los resultados obtenidos a lo largo de la investigación. Se muestran de acuerdo a la secuencia planteada en la planificación. En el siguiente capítulo se abordará el análisis de los datos obtenidos.

5.1. Estudio de los parámetros de procesado láser

Uno de los objetivos de esta tesina de investigación de Máser es analizar y seleccionar los parámetros de procesado láser adecuados para la formación de un cordón de recubrimiento óptimo. Para ello se ha analizado la geometría de los cordones simples obtenidos por la aplicación de un polvo de titanio y carburo de boro mediante láser cladding. La dilución de los carburos en el recubrimiento, así como la dilución del material base o sustrato intervendrán de forma significativa en las propiedades mecánicas de dureza y también en las propiedades térmicas, que no obstante, no se han tenido en cuenta en esta investigación.

5.1.1. Geometría de los cordones

Una vez obtenidas las muestras de los cordones y habiendo realizado las fotografías, y analizado las geometrías se procedió a plasmar todos los parámetros por cordones.

Según algunos autores se destacó la dificultad de investigar el efecto de un solo parámetro con su relación con las características del cordón. [J.M. Yellup, 1995]. Se pueden escoger de entre todas las relaciones, las dos más sencillas, que representan bien las relaciones.

- Potencia suministrada por unidad de longitud $\rightarrow P/V_{avance}$
- Cantidad de material soplado por unidad de longitud o densidad de polvo $\rightarrow F/V_{avance}$

Para clasificar de alguna manera, teniendo en cuenta los parámetros del láser, se procede a clasificar los diferentes cordones en relación a la potencia suministrada y la velocidad de avance.

3g/min							
CORDÓN	V avance						
	(mm/min)	P (W)	Wc (μm)	Hc (μm)	Ac (μm) ²	Hd (μm)	Ad (μm) ²
#1.1	400	500	2931,81	548,75	1162404,81	369,4	617162,12
#2.1	400	600	2672,58	561,01	1074875,84	290,1	413683,65
#3.1	400	700	2273,08	515,37	1009094,88	104,35	92521,82
#4.1	400	800	3717,03	464,27	1376758,75	751,87	1663846,76
#5.1	400	900	3384,23	525,69	1341731,28	633,16	1152395,13
#6.1	400	1000	2956,62	492,94	1212141,11	496,12	844831,09
#7.1	600	500	2250,85	295,86	523219,93	170,82	176073,51
#8.1	600	600	2448,45	368,42	576844,36	260,39	300674,02
#9.1	600	700	2618,55	326,66	641622,73	342,25	471856,1
#10.1	600	800	2658,62	351,58	700620,64	419,21	557208,95
#11.1	600	900	2971,57	365,36	811743,26	494,88	802452,11
#12.1	600	1000	3132,76	347,97	828295,07	504,36	1018656,66
#13.1	800	500	1897,28	190,72	311463,89	68,6	30576,17
#14.1	800	600	2134,8	184,11	349572,47	162,75	140057,88
#15.1	800	700	2353,71	223,22	383955,45	244,58	277664,1
#16.1	800	800	2398,93	248,72	453833,43	252,94	350236,54
#17.1	800	900	2591,29	226,1	493457,59	311,04	490903,15
#18.1	800	1000	2787,4	266,84	542812,11	375,67	603676,58

Tabla 2 Tabla valores geométricos y parámetros cordones para un flujo de polvos de 3 g/min

En esta primera tabla se contemplan los 18 cordones para un parámetro de láser fijo; el flujo de polvos, delimitado a 3 gr/min. Los cordones están agrupados por las tres velocidades de avance y después diferenciadas por potencias. De esta forma se tiene un abanico bastante extenso de los parámetros y el cordón creado. A primera vista se puede ver que la potencia influye en la altura del cordón y de la zona de dilución; como se puede ver en la bibliografía, la potencia es un parámetro que efectivamente influye en esta dimensión, pues a mayores potencias, mayor energía y más penetración en el material base, disminuyendo

la altura del clad y aumentando la altura de la zona de dilución. Así mismo se puede ver también la influencia de la velocidad. En efecto, a mayores velocidades, menores anchuras del cordón. Esto es debido al menor calor aportado y mayor rapidez de enfriamiento, que impide la difusión del material y formar un cordón más ancho.

5g/min							
CORDÓN	V avance	P (W)	Wc (μm)	Hc (μm)	Ac (μm) ²	Hd (μm)	Ad (μm) ²
	(mm/min)						
#1.2	400	500	2732,45	723,87	1412493,16	0	0
#2.2	400	600	2727,07	731,76	1502384,2	121,08	119402,92
#3.2	400	700	3015,86	740,56	1756087,54	243,02	295854,93
#4.2	400	800	3105,45	740,5	1764543,64	442,4	500088,81
#5.2	400	900	3329,42	701,49	1911881,11	537,4	850173,66
#6.2	400	1000	3603,74	837,53	2247509,34	595,43	1055599,99
#7.2	600	500	2396,79	392,95	803822,92	97,71	49524,8
#8.2	600	600	2578,87	490,03	964872	160,43	175373,71
#9.2	600	700	2617,1	463,19	921336,19	270,82	318332,06
#10.2	600	800	2802,29	465,43	975569,32	333,37	479311,79
#11.2	600	900	2868,26	471,49	1136656,05	361,26	541388,84
#12.2	600	1000	3117,88	494,8	1227943,05	417,89	742871,24
#13.2	800	500	1854,46	258,67	351492,11	78,44	49126,06
#14.2	800	600	2039,4	255,27	444920,25	116,65	100092,1
#15.2	800	700	2211,75	285,46	443764,58	203,17	232855,38
#16.2	800	800	2279,8	257	468477,67	304,67	383227,25
#17.2	800	900	2436,8	279,27	541730,28	324,67	476381,16
#18.2	800	1000	2754,98	307,74	594249,64	359,81	599495,38

Tabla 3 Tabla valores geométricos y parámetros cordones para un flujo de polvos de 5 g/min

En cuanto a esta tabla, se puede observar lo mismo que en la tabla anterior, cambiando el parámetro de flujo de polvos, que aumenta a 5 gr/min. De primera vista se puede ver que los valores son un poco menores que para el caso de 3 gr/min. Esto concuerda con el principio básico del transporte de masa y energía,

pues si existe una mayor masa para una misma energía aportada, la masa verá incrementada su temperatura en menor medida, por ello existe una difusión menor y menor dilución de los carburos, que a su vez hacen que los cordones sean de dimensiones más pequeñas.

Para poder estudiar mejor los parámetros y cómo afectan a los cordones, se procede a distribuir los resultados según la potencia suministrada para una misma velocidad.

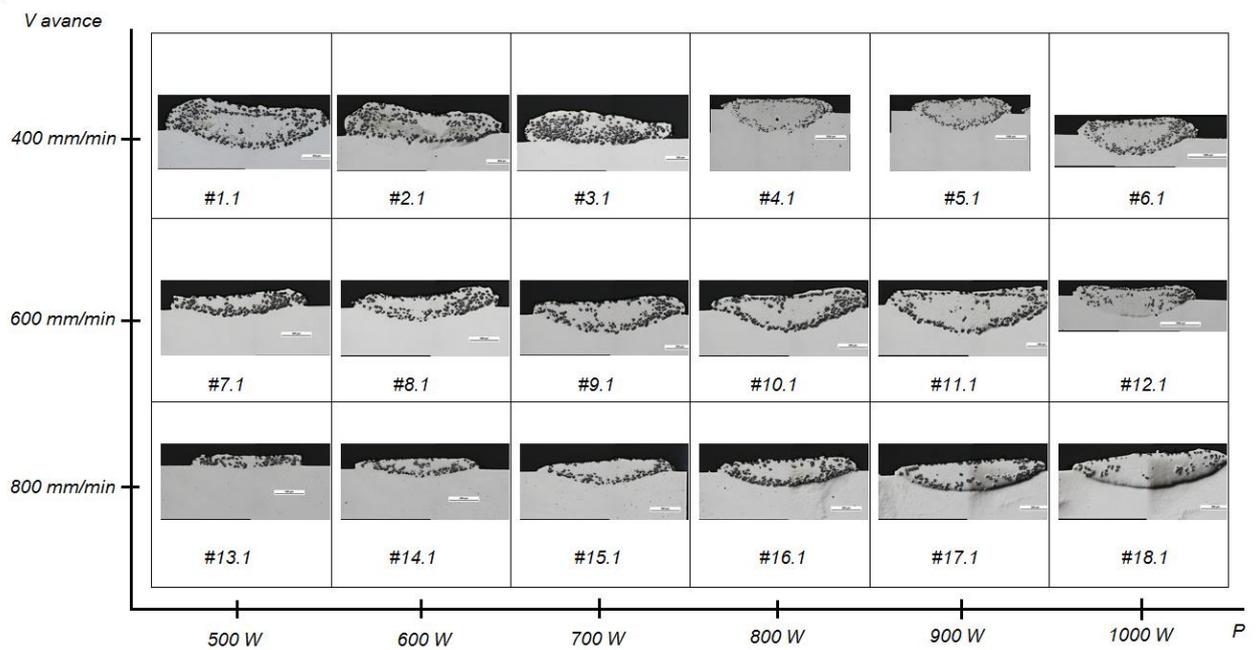


Tabla 4 Relación cordones a misma potencia y diferentes velocidades para un flujo de 3 g/min

Se puede observar que para altas potencias y bajas velocidades existe una gran dilución central, y los carburos de boro repartidos por la zona limítrofe del cordón. Esto es debido a las corrientes de Marangoni creadas por el aporte de material y las variaciones de densidad en el fundido. Para alta velocidad y baja potencia se consigue lo que algunos autores consideran la geometría perfecta de un cordón: rectangular y sin zona (o muy escasa) de dilución del sustrato. No obstante se puede observar que existe gran cantidad de carburos sin disolver, que podría ser beneficioso si el titanio actúa como matriz y los carburos como refuerzo, siendo así casi un material compuesto, aunque formado *in situ*. Y debería tener matriz porque los carburos, al ser tan duros en comparación con el material que lo envuelve, que si se ve expuesto directamente a esfuerzo

cortante se desprende con facilidad de su zona, rayando o incluso deformando el resto del material.

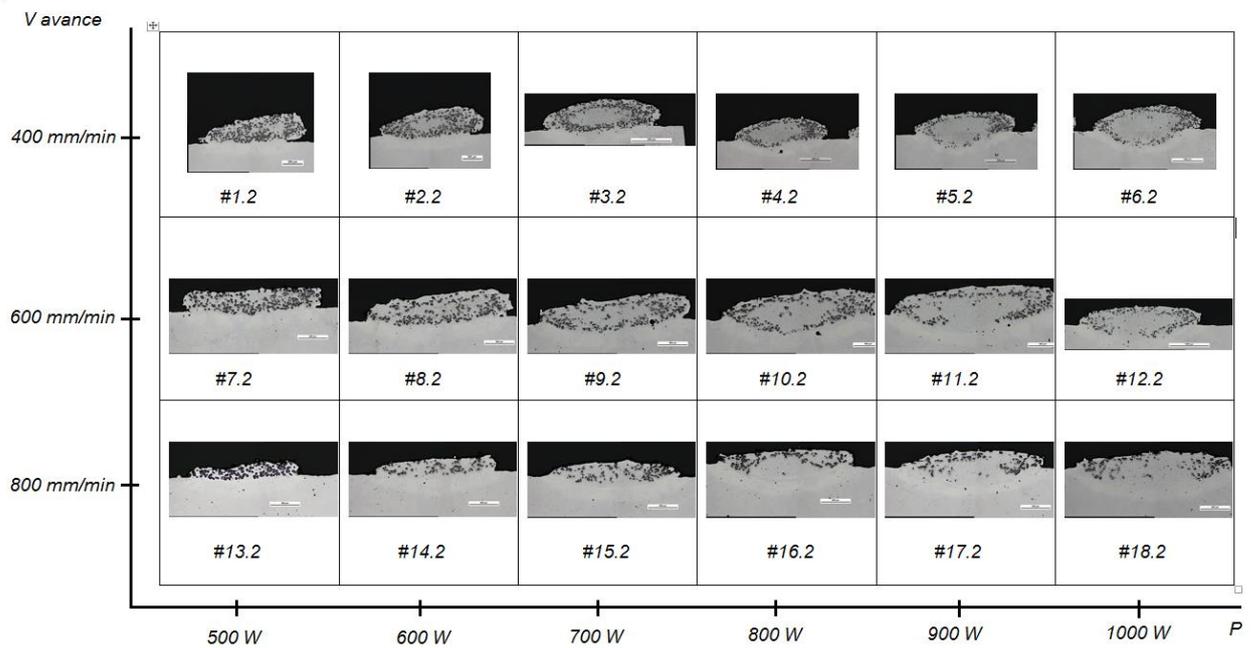


Tabla 5 Relación cordones a misma potencia y diferentes velocidades para un flujo de 5 g/min

En todos los cordones se puede ver que hay buena unión metalúrgica entre el cordón y el material base. No hay ningún cordón que presente separación grande con el sustrato, si ocurre esto para baja velocidad de avance y baja potencia. A medida que aumenta la potencia, se puede ver que aumenta la zona más blanquecina, que será la zona con mayor disolución de los carburos y se distribuirán las partículas grandes del carburo según las corrientes de Marangoni. También se puede observar que para mayores flujos de polvo se consiguen mayores alturas del clad.

Altura de los cordones

Después de obtener las relaciones geométricas de los cordones se puede establecer una relación entre F/V y la altura del clad.

Para los cordones realizados a 3 g/min de aporte de material de recubrimiento se tiene:

3g/min				
CORDÓN	V avance (mm/min)	P (W)	Hc (μm)	F/V (g/m)
1	400	500	548,75	7,5
2	400	600	561,01	7,5
3	400	700	515,37	7,5
4	400	800	464,27	7,5
5	400	900	525,69	7,5
6	400	1000	492,94	7,5
7	600	500	295,86	5
8	600	600	368,42	5
9	600	700	326,66	5
10	600	800	351,58	5
11	600	900	365,36	5
12	600	1000	347,97	5
13	800	500	190,72	3,75
14	800	600	184,11	3,75
15	800	700	223,22	3,75
16	800	800	248,72	3,75
17	800	900	226,1	3,75
18	800	1000	266,84	3,75

Tabla 6 Relación F/V con Hc para 3 g/min

Esta tabla representa otra forma de poder ver la influencia de los parámetros de láser con las dimensiones geométricas del cordón. Esto se ha hablado diversas veces en muchos artículos y tesis. Uno de los valores más recurridos es la relación F/V, que permite estudiar la cantidad de polvos por unidad de longitud, adimensionalizando de alguna forma los demás parámetros y poder comparar directamente dos cordones con dos flujos de polvos distintos.

CORDÓN	V avance (mm/min)	P (W)	Hc (μm)	F/V (g/m)
1	400	500	723,87	12,5
2	400	600	731,76	12,5
3	400	700	740,56	12,5
4	400	800	740,5	12,5
5	400	900	701,49	12,5
6	400	1000	837,53	12,5
7	600	500	392,95	8,33333333
8	600	600	490,03	8,33333333
9	600	700	463,19	8,33333333
10	600	800	465,43	8,33333333
11	600	900	471,49	8,33333333
12	600	1000	494,8	8,33333333
13	800	500	258,67	6,25
14	800	600	255,27	6,25
15	800	700	285,46	6,25
16	800	800	257	6,25
17	800	900	279,27	6,25
18	800	1000	307,74	6,25

Tabla 7 Relación F/V con Hc para 5 g/min

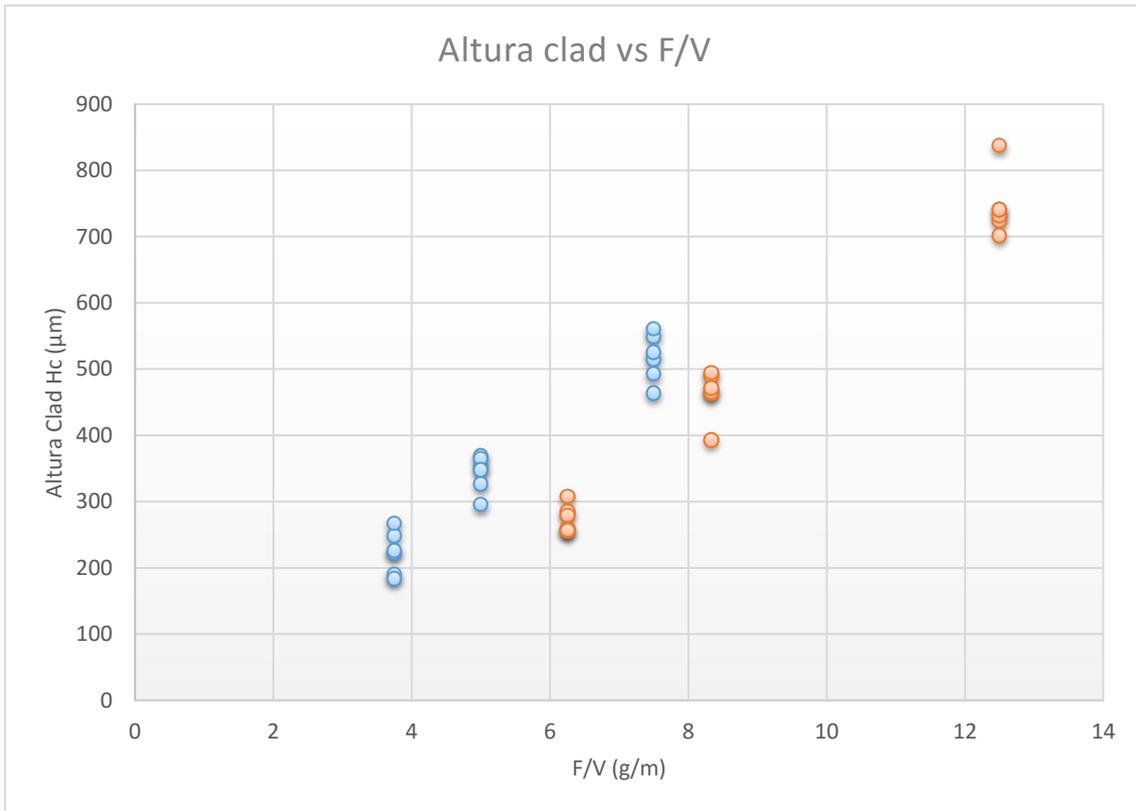


Tabla 8 Gráfica relaciones F/V con Hc

De los datos anteriores se puede observar que existe una relación lineal entre la cantidad de polvos aportados por metro y la altura del clad. Esto es lógico, pues cuanto más material se aporta, más altura debería en principio alcanzar.

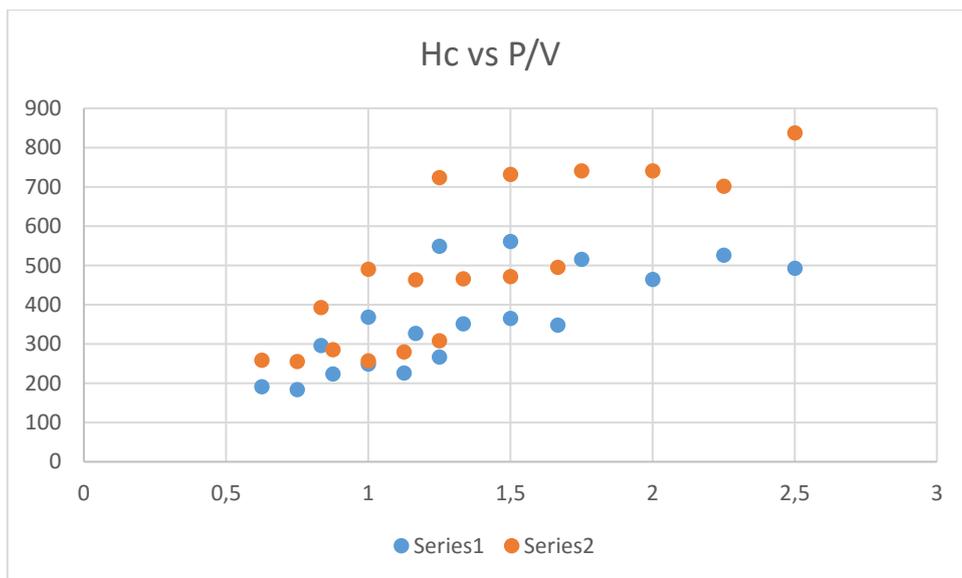


Tabla 9 Gráfica de Hc vs P/V para los dos flujos. En azul 3 g/min y en amarillo para 5 g/min

Así mismo se puede observar que para una misma relación de potencia/velocidad, existen 2-4 cordones que coinciden en valor de P/V. Cuanto mayor es esta relación y mayor es el flujo de polvos aportados, mayor altura del clad. Es decir, para mayores velocidades se consiguen alturas menores, a igualdad de potencias. Si se mantienen la relación de P/V, pero se aumentan de forma proporcional ambos parámetros, se conseguirán menores alturas del cordón. Esto es debido a que para mayores potencias se proporciona mayor energía que puede fundir el material base y penetrar mayormente el cordón dentro del sustrato.

Altura de la dilución del cordón/sustrato.

Se ve interesante también resaltar la zona de dilución, pues interesa que haya la menor dilución posible, para conseguir mantener intacto el sustrato.

De forma general, al aumentar la relación de cantidad de polvos por unidad de longitud se consigue aumentar la altura de dilución del cordón en el material base. De entrada, según se puede observar en las imágenes, para los clad con una potencia menor y velocidad de avance más alta se consigue una ínfima zona de dilución, que aumenta con la potencia del láser y se puede apreciar que con el aumento de la velocidad se forma también menor zona de dilución. Esto es un poco difícil de ver a primera vista, pues puede ser debido a otros factores no considerados. No obstante, tiene cierta lógica, pues con el aumento de la potencia y la disminución de la velocidad de avance, se consiguen mayores relaciones de potencia absorbidas por el sustrato, y por tanto se consigue mayor energía que se transfiere a la base, con su consiguiente disolución de los carburos del aporte en la matriz del sustrato.

Cuanto mayor es la velocidad y menor la potencia, se consiguen unos perfiles de cordón más rectos y sin dilución del material base. No obstante, como también se puede observar en las microfotografías, apenas hay disolución de los carburos de boro. Mediante SEM y los ensayos de dureza se comprobará si realmente existe fase de Boruro de titanio, que es el que se busca o si no. Si existiese dicha fase, en principio sería el cordón más deseado, pues exigiría un menor rectificado y sin zona de dilución; aunque no obstante deberían hacerse pruebas de adhesión del cordón, porque pudiere ser que la interfase recubrimiento-base fuese débil y quebrarse o separarse.

Por tanto, a mayores tiempos de *residencia* del láser, mayores alturas de dilución y por tanto, de área de dilución. Así mismo, la relación de aspecto Clad/dilución se vería disminuida con la misma relación de tiempos de láser.

5.1.2. Microestructura de los cordones

La composición del material base y los polvos de recubrimiento se parecen bastante: el polvo está constituido por Titanio y carburo de boro y el sustrato de Ti-6Al-4V. Esto hace que la zona de separación se vea a veces difícilmente. No obstante se puede apreciar un cambio de densidad, por el cual sí puede distinguirse dicha zona. Se procede a indicar para los cordones que se consideran más representativos o que se ha observado alguna zona destacable, y para no representar en la presente memoria un listado muy largo que pueda hacerse repetitivo. Para los casos que se indique se mostrará una microfotografía a 50x del cordón entero y otra/s microfotografías a 250 ó 500x según se considere más oportuno debido a que se consideran zonas de interés para poder observar el tipo de microestructura formada.

Cordón #1.1

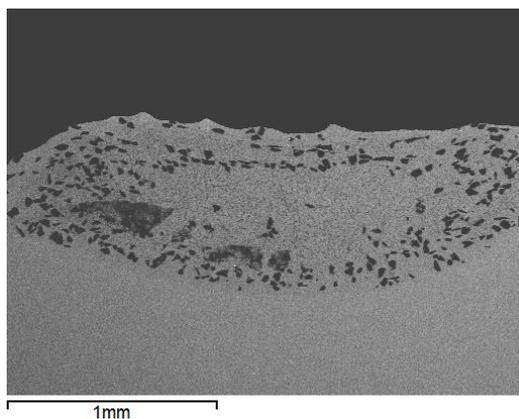


Ilustración 22 Cordón #1.1 a 50x.

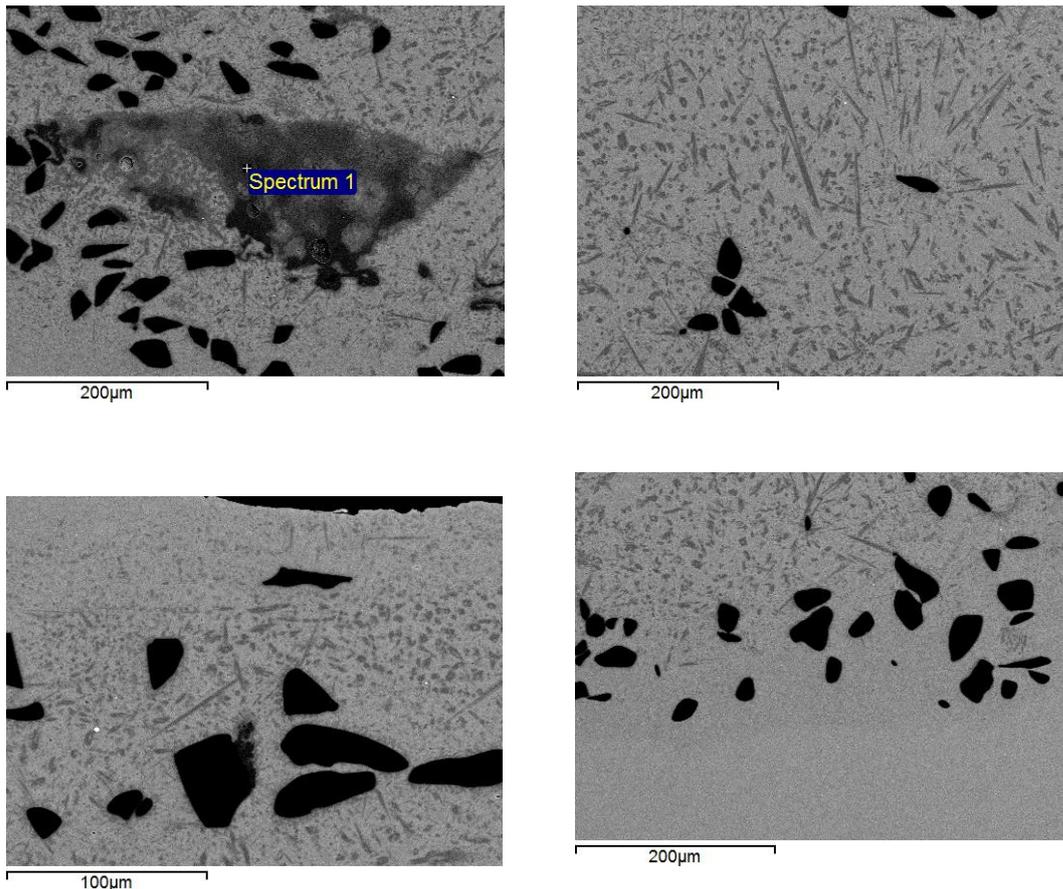


Ilustración 23 Cordón #1.1. Arriba izda detalle disolución carburo de boro. 250x. Arriba derecha zona central 250x, abajo izda zona interfase 250x y abajo dcha detalle zona superior 500x

Con las microfotografías realizadas en SEM se puede observar con bastante facilidad las estructuras formadas en el cordón. Radialmente a los carburos, los granos de boruros de titanio van creciendo, alimentándose de la dilución de los carburos de boro y creciendo en forma de aguja hasta que la energía se ve disminuida al punto de ya no diluir más el carburo *grande*. Se forma pues un material compuesto, por decirlo de alguna manera, de forma *ipso facta* e *in situ*. Al mismo tiempo que se aporta material, se forman unos *whiskers* embebido en una matriz de titanio, algún carbono, algún boruro tal vez y en zona interfase quizás también en presencia de vanadio y aluminio. Los boruros de titanio actuarían como refuerzo y podrían actuar como unos anclajes para los carburos de boro, ya que por su extrema dureza pueden perder su adhesión al material base ante un esfuerzo cortante, como ya se ha mencionado.

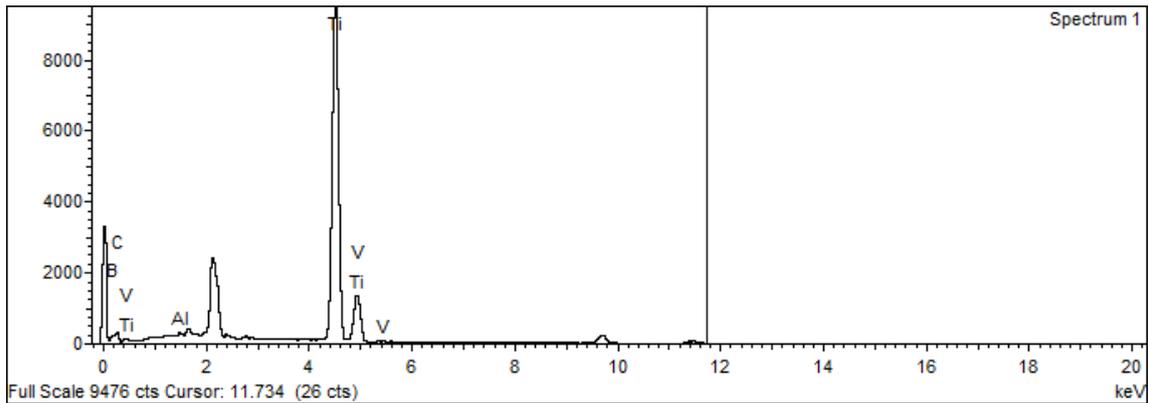


Ilustración 24 Espectro EDS SEM #1.1.

Element	Weight%	Atomic%
B K	12.85	35.75
C K	5.04	12.63
Al K	0.23	0.26
Ti K	80.38	50.48
V K	1.50	0.88
Totals	100.00	

Ilustración 25 Porcentajes elementos punto análisis #1.1

A pesar del bajísimo peso atómico del boro y la escasa energía que devuelve de los EDS, se puede observar que el detector sí detecta boro. No obstante no se puede saber exactamente qué estructura forma con los titanio, que no obstante y como se ha comentado es factible que sean monoboruros. La presencia de vanadio y aluminio pone de manifiesto la dilución del sustrato y la difusión de sus elementos hacia el cordón. Es una situación no deseada pero tampoco puede ser evitada, aunque sí minimizada con unos parámetros de láser que permitan bajas corrientes de marangoni, gran responsable del desplazamiento de estos elementos a zonas superficiales del cordón.

Cordón #4.1

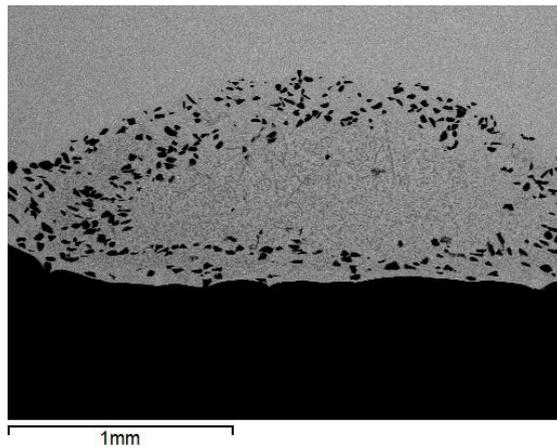


Ilustración 26 Cordón #4.1 a 50x.

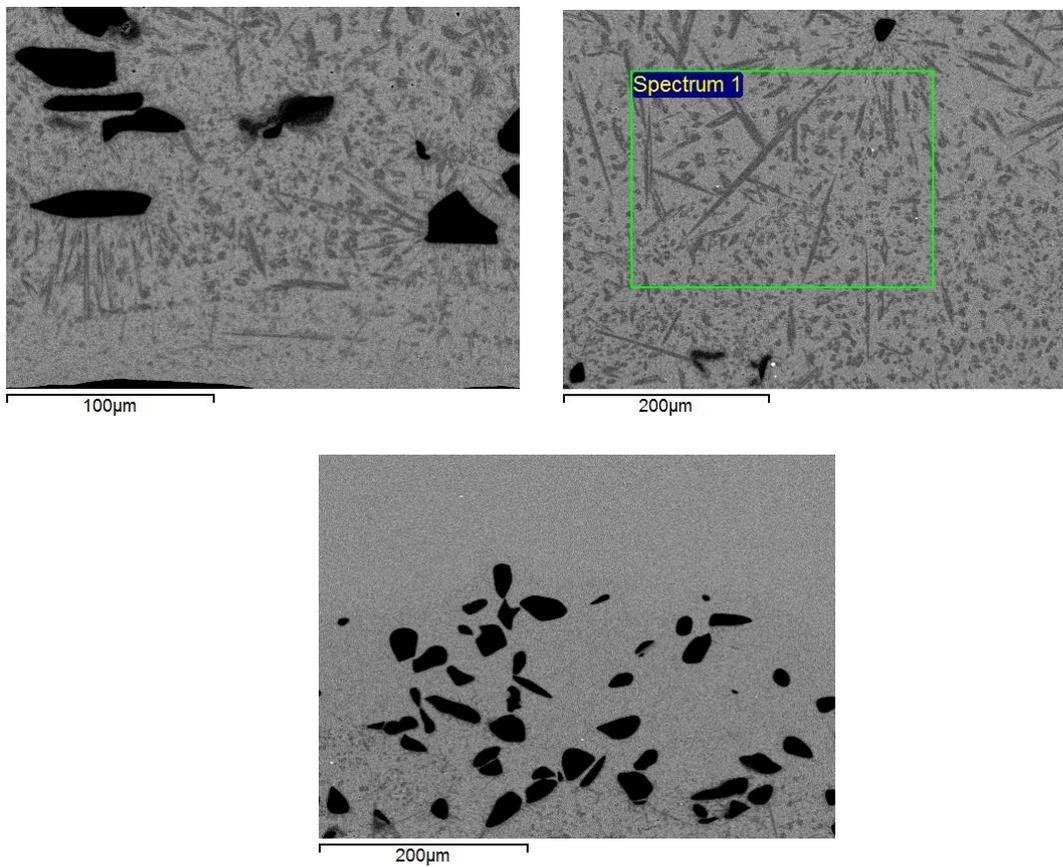


Ilustración 27 Arriba izda zona superficie detalle 500x. Arriba dcha 250x zona central más cuadro análisis EDS. Abajo zona interfase 250x

En este cordón se puede apreciar la gran zona central con los carburos prácticamente diluidos, formando una matriz con boruros de titanio como refuerzo.

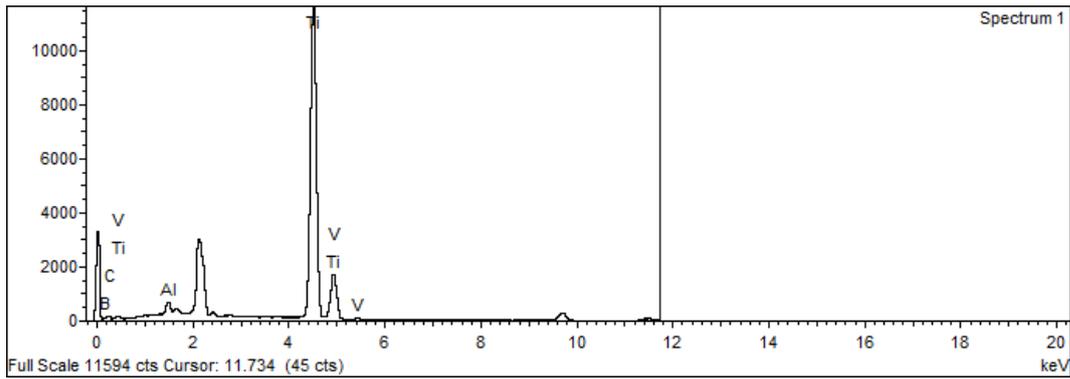


Ilustración 28 Espectro EDS #4.1

Element	Weight%	Atomic%
B K	3.87	14.32
C K	1.84	6.12
Al K	1.25	1.86
Ti K	91.38	76.39
V K	1.67	1.31
Totals	100.00	

Ilustración 29 Porcentajes elementos zona análisis #4.1

Cordón #5.1

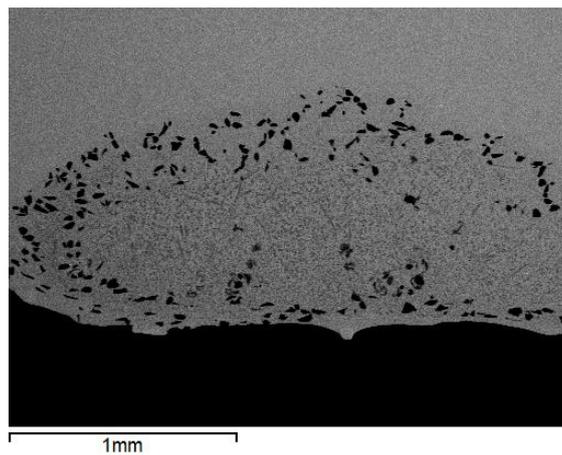


Ilustración 30 Cordón #5.1 a 50x.

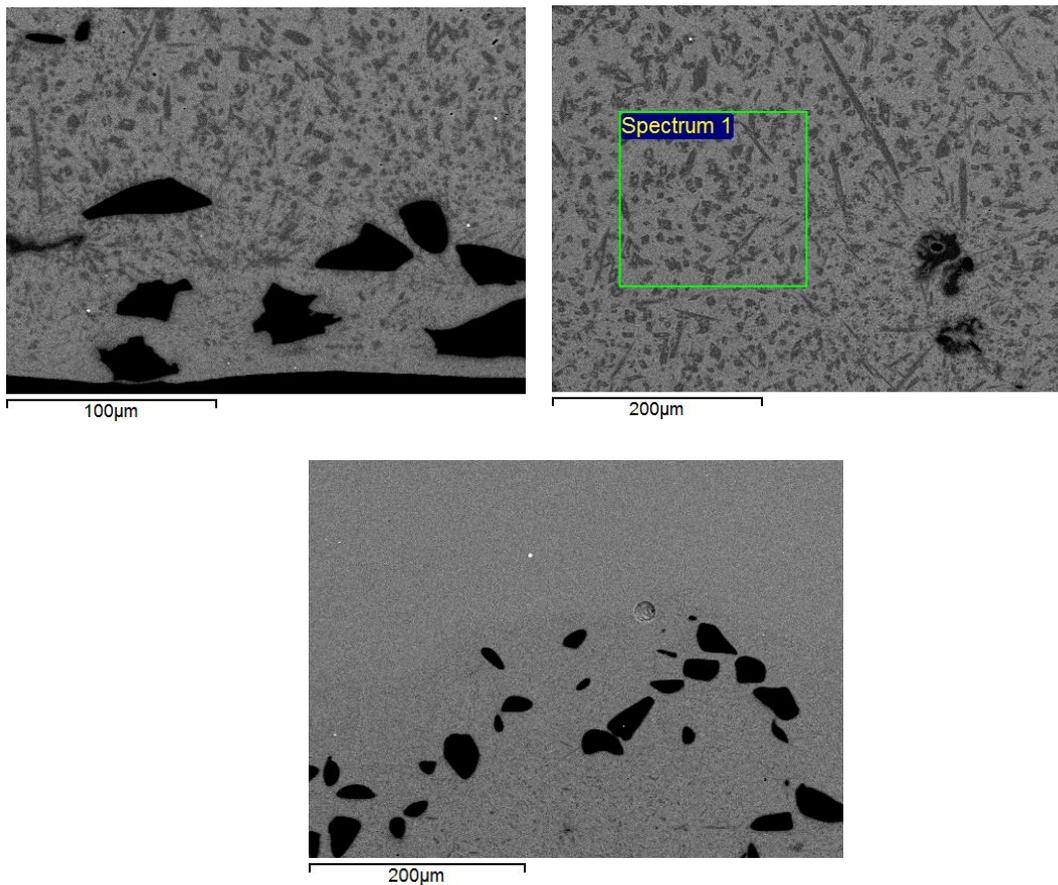


Ilustración 31 Cordón #5.1. Arriba izquierda detalle superficie 500x. Arriba izda zona central 250x con cuadro para analizar EDS. Abajo zona interfase 250x.

En ese cordón se puede apreciar cómo hay varias zonas influencias por varias corrientes de marangoni y no sólo de una global. Esto es debido a una gran energía y velocidad de avance pequeña, lo que conduce a gran dispersión de la dilución de los carburos de boro, formando una especie de *vigas* internas de carburo de boro. Como se ve, grandes cantidades de energía, que se traduce en gran potencia y baja velocidad interfiere en las dimensiones y geometría del cordón.

Element	Weight%	Atomic%
B K	3.81	14.05
C K	2.04	6.77
Al K	1.51	2.23
Ti K	90.58	75.34
V K	2.06	1.61
Totals	100.00	

Ilustración 32 Porcentajes elementos zona análisis #5.1

Cordón #11.1

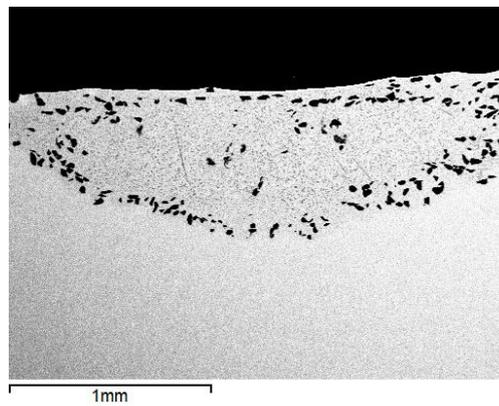
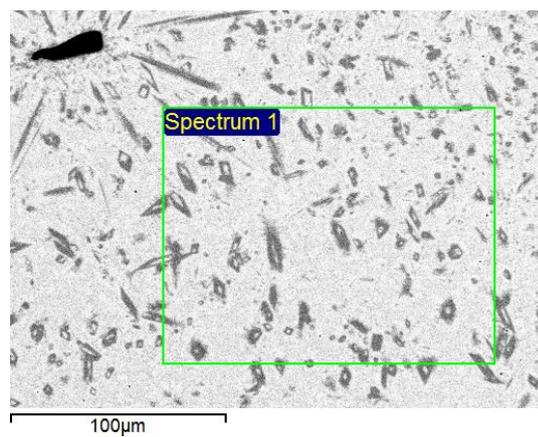
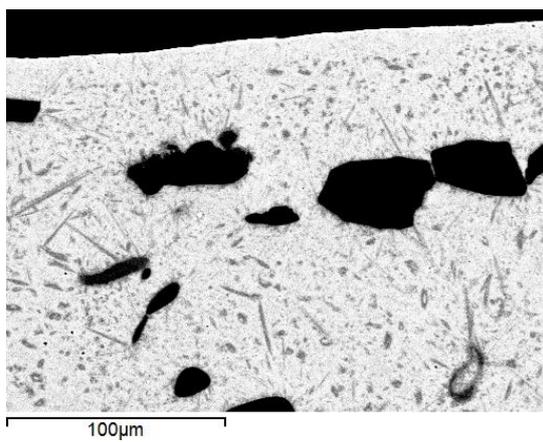


Ilustración 33 Cordón #11.1 a 50x.



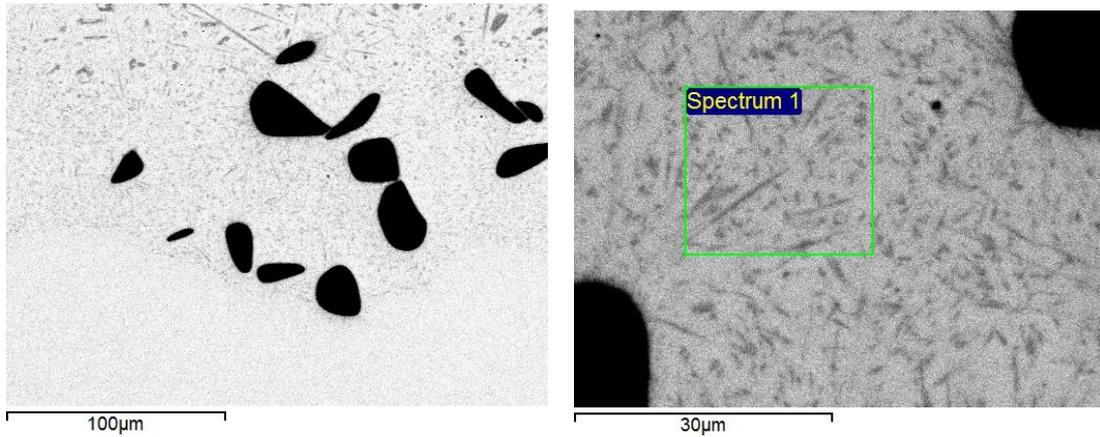


Ilustración 34 Cordón #11.1. Arriba izda zona superficie 500x. Arriba dcha zona central 500x más cuadro EDS. Abajo izda zona interfase 500x. Abajo dcha detalle interfase 2000x.

Element	Weight%	Atomic%	Element	Weight%	Atomic%
B K	3.17	11.92	B K	3.26	12.14
C K	1.85	6.29	C K	1.99	6.65
Al K	1.76	2.66	Al K	2.86	4.26
Ti K	90.92	77.30	Ti K	87.74	73.68
V K	2.30	1.83	V K	4.15	3.28
Totals	100.00		Totals	100.00	

Ilustración 35 Porcentajes elementos. Izda pertenece a zona central y datos dcha a zona interfase.

De todas las imágenes anteriores extraídas del microscopio electrónico de barrido, se tiene que decir que se realizaron un número mayor de análisis, correspondientes a los cordones que faltan. No obstante se han considerado unos pocos que son representativos, intentado escoger cordones que abarcasen los parámetros principales.

De las imágenes se extrae la información sobre la disolución de los carburos de boro. Conforme se aumenta la potencia del láser, existe una mayor energía en forma de calor que alcanza mayores temperaturas y consiguen fundir más masa de material refuerzo (carburo de boro), que a su vez es capaz de refundir con el

titanio del polvo suministrado y formar boruros de titanio. En su mayoría se puede apreciar una estructura en forma de agujas con un núcleo, que se correspondería con TiB o monoboruro de titanio; aunque también podría considerarse TiB₂; Con EDS se obtuvieron valores de Boro, aunque al ser un elemento tan ligero es difícil para el detector saber exactamente cuanto boro. Por ese motivo no ha sido posible cuantificar exactamente qué cantidad existe de Diboruro de titanio, boruro de titanio, u otra estructura. Sí que se puede afirmar que existe TiB_x, y se podría afirmar también casi con rotundidad que la mayoría se corresponde con la forma de monoboruro. Así mismo, según el EDS existe casi para todos los casos presencia de Carbono. Aquí ocurre lo mismo que con el boro, pues es un elemento muy ligero y es muy complejo su detección. No obstante como el material cerámico aportado lleva carbonos, se puede deducir que se forman también estructuras del tipo TiC, así como B_xC. Evidentemente existen también estructuras enteras de B₄C, pues no se disuelven completamente. Se necesitarían mayores energías y mayores tiempos de calentamiento de la pieza.

En las zonas próximas a la interfase se pueden apreciar también otros elementos, presentes en el material base. Vanadio y Aluminio. Esto quiere decir que al difundir el recubrimiento con el sustrato se han producido difusiones de estos elementos de la aleación base al recubrimiento. No obstante se encuentran localizados en la zona más próxima a la interfase y en muy poca cantidad.

Otra característica que se puede observar en algunos cordones, es una especie de “capa” con presencia de aluminios y vanadios. Esto es debido a las corrientes de Marangoni, que arrastran estas partículas a la superficie y al enfriarse rápidamente se impide que sigan difundiendo. Cuanto mayor es la energía, mayores son dichas corrientes y mayor concentración de estos elementos en la superficie.

En alguna muestra se observaron partículas blancas, que se corresponden con Titanio puro, que se encuentra en la mezcla de polvos para realizar el recubrimiento.

En resumen, geométricamente los cordones interesarían según algunos autores cuanto más cuadrados y con menor dilución, mejor. Estos se dan en las condiciones de velocidades de avance medias (tomando referencia el mapa de

cordones de la presente investigación) y energías pequeñas. No obstante según la microestructura, interesaría que los cordones fuesen hechos con algo más de potencia, para poder disolver los carburos de boro y formar compuestos de boruros de titanio. Además, según se pudo ver en la fase de elaboración, los carburos de boro, que aunque tremendamente duros, pueden ser arrancados con facilidad una vez se ha llegado a ellos. Por lo tanto interesaría que en la superficie no hubiese gran cantidad de estos carburos, a no ser que se quieran usar como material de sacrificio. No obstante con unas potencias medias, tomando igualmente el mapa de parámetros de esta investigación, se podrían conseguir grandes zonas de disolución y TiB. La superficie tendría B_xC, pero que con su correspondiente rectificado se eliminarían y se quedaría cordón cuadrado.

Personalmente creo que debería existir un cierto porcentaje de dilución, para que pueda haber mejor interfase y que haya una adaptación de dureza entre el recubrimiento y la base.

Recubrimiento

El recubrimiento es obtenido mediante un solape de cordones. Se sabe que el flujo de polvos con el que se realizó es de 3 gr/min, no obstante no se sabe ni velocidad de potencia del láser. Mediante comparación con los cordones se podría casi afirmar que la velocidad de trabajo es la intermedia, de 600 mm/min y que su potencia de trabajo se encontraría entre 600 y 900 W, pero que me aventuraría a afirmar que son 800 W, ya que las formas del cordón, zona interfase, etc tienen gran parecido con las características de este cordón correspondiente. Es decir, el recubrimiento estaría hecho mediante solape de cordones de 3g/min de alimentación de polvos, a una velocidad de 600 mm/min y 800 W.

En cuanto a la microscopía electrónica de barrido para el recubrimiento:

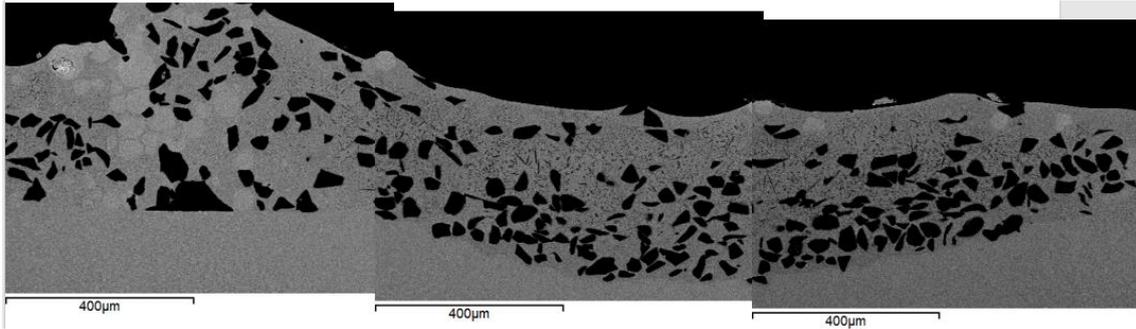


Ilustración 36 Composición recubrimiento 50x

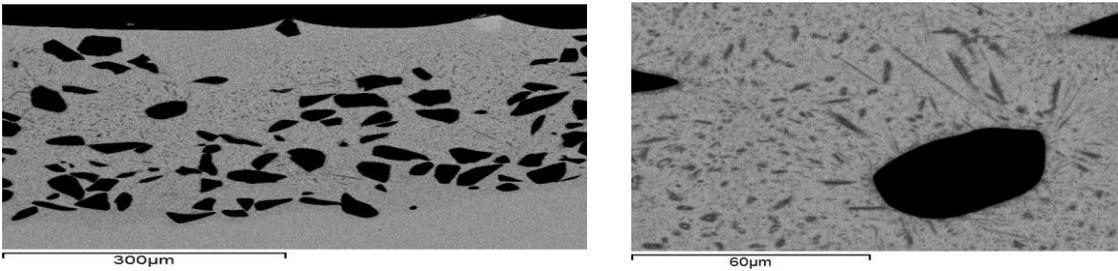


Ilustración 37 Recubrimiento 200x(izda) y detalle formación boruro titanio en zona centro a 1000x, dcha

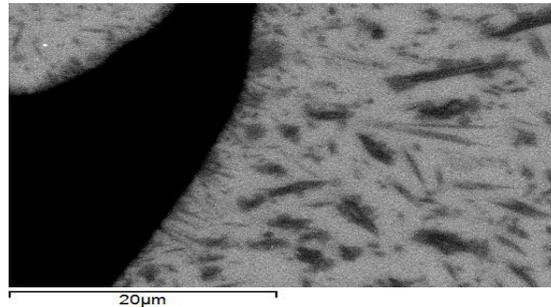


Ilustración 38 Detalle disolución carburo y formación boruro titanio en zona centro. 3000x

Se puede deducir que los parámetros escogidos para crear este recubrimiento no son esencialmente buenos, pues se crean cordones con *depresiones*, con alturas del cordón bajas y alta dilución, además de falta de contacto entre cordones, debido a la gran transmisión de calor que fluye hacia el sustrato y pliega los bordes, creando unas rebabas, sin contacto con el sustrato o el cordón. Además se pueden observar varias partículas más blanquecinas, que se corresponden con titanio puro, del polvo de origen. Esto se trata de un fallo de producción. Se debería volver a hacer un recubrimiento con los parámetros que mejor se adaptan, eligiendo una velocidad más alta con potencias bajas-medias, para poder obtener cordones rectangulares sin dilución del sustrato.

5.1.3. Dureza de los cordones

El recubrimiento o cordón posee una dureza superior al sustrato. Para la experimentación de la microdureza se procedió a tomar unas cuantas mediciones a lo largo de cada cordón, intentando realizar las mediciones sobre material homólogo, para tener una media de dureza por cordón y poder relacionarlo con los parámetros del láser y la dureza que se consigue, o lo que es lo mismo, relacionarlo con la disolución del carburo de boro y formación de boruro de titanio. Se realizó también una medición de la dureza del carburo de boro para poder tener una referencia, así como tener también referencia del sustrato. Se indica mediante tabla resumen los datos obtenidos:

	Ti64	140	HV	
	B4C	4200	HV	
3 g/min	HV		5 g/min	HV
1	470,5		1	375,2
2	1211		2	439
3	461		3	511
4	560		4	530
5	563		5	601
6	566		6	541
7	449		7	387
9	483		9	422
11	490		11	403
14	419		14	382
16	467		16	390
18	498		18	376

Tabla 10 Durezas cordones, sustrato y carburo de boro

En esta gráfica se pueden ver unas medias aritméticas de las durezas de cada cordón. Se tomaron mediciones en las zonas donde había dilución del carburo de boro y se hubiera formado boruro de titanio, para poder medir y relacionar de alguna forma las características de potencia con la cantidad de boruro de titanio formado, ya que éste es más duro que el titanio, como se podrá ver a continuación.

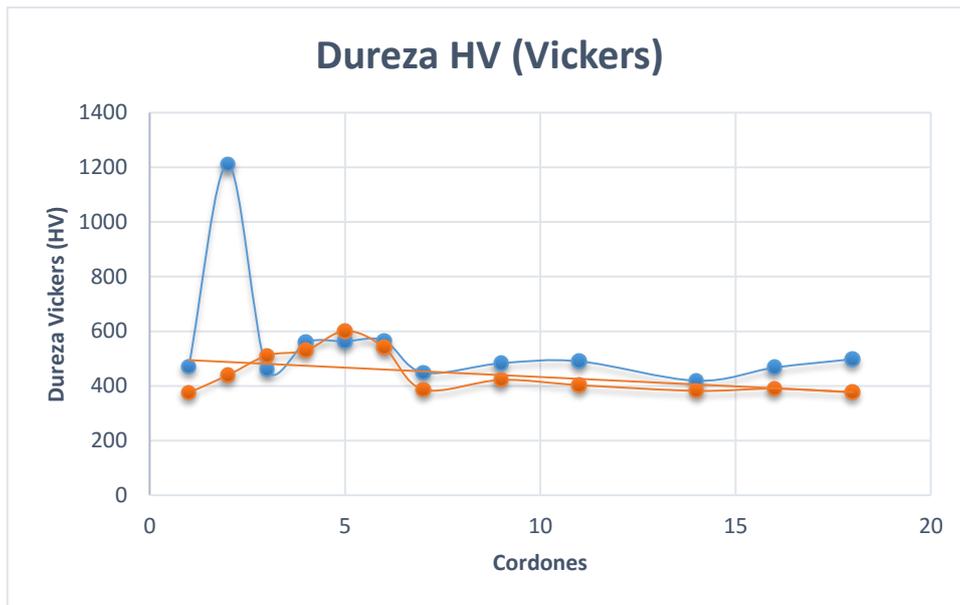


Ilustración 39 Gráfica durezas y línea tendencia

Se puede apreciar que para mayores energías, que se corresponden con los cordones 6,12,18 existen ligeros aumentos de dureza; es decir con el aumento de la energía transmitida, se consigue disolver más los carburos y poder formar fases duras de boruros de titanio y algún carburo de titanio. No obstante de manera global se sigue una tendencia negativa; es decir cuanto mayor es la velocidad de avance, menor dureza se consigue. Esto es lógico pues al aumentar la velocidad, el tiempo de residencia del láser es menor y por tanto menor energía y temperatura habrá para disolver los carburos. No obstante la influencia de un parámetro (potencia/velocidad) eclipsa al otro, por lo que se puede compensar en términos de dureza un parámetro con otro. Esto influirá a la hora de determinar qué parámetros son los adecuados, fijándonos en la forma del cordón, zona de dilución, etc más que en la propia dureza, pues más o menos tienen todos los cordones la misma dureza, aunque siendo mayor para aquellos cordones con velocidades más lentas.

Existe no obstante un pico anormal, que puede deberse a un error en las mediciones, etc. Se ha dejado el valor, pero como es lógico no se tendría en cuenta este cordón o estas mediciones.

Haciendo un valor medio de todas las durezas, se podría decir que la dureza de este recubrimiento es de 475 HV. Si la dureza del Ti-6Al-4V es de 140 HV más o menos, habríamos endurecido la superficie del material unas 3-4 veces.

6. Conclusiones

Habiendo partido de un sistema de Láser Cladding coaxial, con alimentación de polvos de carburo de boro y titanio sobre un sustrato de Ti-6Al-4V, y llevando a cabo un diseño de experimentos que seguían un proceso gradual, se ha llegado a estudiar el proceso para poder determinar una relación entre las variables del proceso de láser y la estructura de los cordones, así como el recubrimiento obtenido.

Tras haber realizado el trabajo experimental se puede concluir que:

- Es posible obtener relaciones basadas en la experimentación que se asemejan a otros autores, dando resultados aceptables y pudiendo relacionar parámetros del proceso con las características geométricas y microestructurales del cordón de titanio y carburo de boro.
 - o Se puede concluir que los parámetros óptimos son aquellos que permiten un cordón geoméricamente rectangular, con baja dilución. En este sentido obtendríamos, según el mapa de operaciones de esta investigación, unos parámetros de 600mm/min de velocidad de avance, de 500 a 700 W de potencia del láser. En cuanto al flujo de polvos, no hay una diferencia muy grande.
 - o Con mayor relación de polvos por minuto se consigue mayores corrientes de Marangoni que permiten difundir elementos del material base, así como disolver de forma un poco más efectiva los carburos de boro. En este sentido, se podría escoger el flujo de 5g/min, optando por potencias un poco superiores a las anteriormente dichas.
 - o En cuanto a las durezas, no existe una gran dependencia con los parámetros, además que la potencia compensa a la velocidad. En este caso la velocidad sería por ejemplo el parámetro de control. No obstante en términos de dureza se consigue una media óptima para valores medios de velocidad y potencia baja-media, llegando a unas 3-4 veces la dureza del material base.
- Mediante esta técnica y con las condiciones adecuadas se permite una fabricación de cordones óptima sin poros ni grietas, habiendo así mismo una interfase no definida, por lo que significa que hay una interfase de

densidades parecidas que facilitarían la no rotura del recubrimiento y el sustrato. No obstante esto quedaría para futuras investigaciones, poder analizar la interfase.

- La microestructura conseguida se basa básicamente en whiskers o agujas de boruro de titanio y partículas grandes de carburo de boro sin disolver. No existe óxido, pues la atmosfera está muy bien controlada durante el proceso.

7. Bibliografía

W.M. Steen: Laser Material Processing. Springer-Verlag. 2003

U. de Oliveira: Analysis of coaxial laser cladding processing conditions, 2004

Hussam El Cheikh, Analysis and prediction of single laser tracks geometrical characteristics in coaxial laser cladding process, 2011

H.K.S. Rahoma: Effect of (alfa+beta) heat treatment on microestructura and mechanical properties of (TiB+TiC)/Ti-B₂O matrix composite, 2015

H.K.S. Rahoma: Influence of (TiC+TiB) on the microstructure and tensile properties of Ti-B₂O matrix alloy, 2014

Jiheng Wang: Microstructure and mechanical properties of investment casted titanium matrix composites with B₄C additions, 2015

Feng Shu-rong: Microstructure and wear resistance of laser clad TiB-TiC/TiNi-Ti₂Ni intermetallic coating on titanium alloy, 2011

Fei Weng: Microstructure and wear properties of laser cladding Co-based composite coatings on Ti-6Al-4V, 2015

J.M. Yellup: Surface and Coatings technology, 1995

P. Laheurte: Influence of the microstructure on the pseudoelasticity of a metastable beta titanium alloy, 2005

I. Weiss: Thermomechanical processing of beta titanium alloys-an overview, 1998

H. Hosoda: Effects of short time heat treatment on superelastic properties of a Ti-Nb-Al biomedical shape memory alloy, 2006

Tesis doctoral de Dr. Juan Carlos Pereira Falcón: Desarrollo y caracterización de recubrimientos MCrAlY obtenidos mediante técnicas láser para aplicaciones de barrera térmica en aceros inoxidables, 2015

Tesis doctoral de Dra. Irma Inirida Angarita Moncaleano: Análisis de recubrimientos de Ti reforzados con TiB₂ mediante técnicas de recubrimiento láser, 2012

Tesis de máster de don Juan José Candel Bou: Análisis de la influencia de los parámetros del proceso de láser cladding coaxial de recubrimientos de Ti6Al4V sobre Ti6Al4V, 2011

Coated Turbine Blades Combat Circumferential Wear, magazine, 2010

Manoj Masanta: Development of a hard nano-structured multi-component ceramic coating by laser cladding, 2009

Dewen Wang: Synthesis of B₄C-TiB₂ composite powders by the carbide boronizing process, 2014

I.G. Wright: Recent developments in gas turbine materials and technology and their implications for syngas firing, 2006

William F Smith: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, ed Mc Graw Hill. 4 edición