

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 700 454**

51 Int. Cl.:

B23K 26/34 (2014.01)

B22F 3/105 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.04.2010 PCT/GB2010/050686**

87 Fecha y número de publicación internacional: **04.11.2010 WO10125381**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.04.2010 E 10718667 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.10.2018 EP 2424707**

54 Título: **Método de fabricación por adición de capas sucesivas**

30 Prioridad:

28.04.2009 GB 0907226
28.04.2009 EP 09275030

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
15.02.2019

73 Titular/es:

BAE SYSTEMS PLC (100.0%)
6 Carlton Gardens
London SW1Y 5AD, GB

72 Inventor/es:

WESCOTT, ANDREW, DAVID;
MORELAND, BENJAMIN, RICHARD y
SIDHU, JAGJIT

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 700 454 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método de fabricación por adición de capas sucesivas

5 Esta invención se refiere a un método de fabricación por adición de capas sucesivas (ALF), es decir a un método en el que capas sucesivas de material son añadidas unas encima de otras de modo que se acumule una estructura tridimensional. La invención es particular pero no exclusivamente aplicable a la fusión selectiva por láser, y puede ser aplicada tanto a la fabricación de nuevos artículos, como a la reparación de otros usados.

10 En la fusión selectiva por láser se utiliza un haz láser para fundir una cantidad controlada de material en polvo (usualmente metálico) sobre un sustrato, de modo que se forme una capa de material fundido sobre él. Moviendo el haz láser con relación al sustrato a lo largo de un trayecto predeterminado, la capa puede ser definida en dos dimensiones sobre el sustrato, siendo determinada la anchura de la capa por el diámetro del haz láser donde impacta en el sustrato. Repetir el movimiento del láser a lo largo de la totalidad o parte de su trayecto permite que se depositen otras capas de material, fabricando por ello un objeto tridimensional.

15 La fusión selectiva por láser hasta ahora ha sido realizada utilizando láseres de onda continua (CW), típicamente láseres de Nd: YAG que funcionan a 1064 nm. Este puede conseguir elevadas tasas de depósito de material particularmente adecuadas para aplicaciones de reparación o donde es aceptable una operación de mecanización subsiguiente para conseguir el componente acabado. El método sin embargo no conduce por sí mismo a la producción de componentes próximos a la forma neta con tolerancias estrechas y con una elevada calidad de acabado superficial. Realizaciones preferidas de un aspecto de la presente invención buscan abordar este inconveniente.

20 Modular el pulso del haz láser permite que la cantidad de calor aplicada al polvo sea controlada de manera exacta y precisa.

Utilizando un láser de pulso modulado, se puede conseguir un control mucho más fino del proceso de fabricación. Hemos encontrado posible producir capas tan finas como de 10 μ m de grosor.

Mediante "recorrer" queremos decir moverse a lo largo de un trayecto predeterminado por ejemplo bajo control por ordenador. Recorrer no está limitado a moverse en una línea recta desde un borde del sustrato al otro.

25 La cantidad de material en polvo que es fundida para formar la capa, y así el grosor de la capa dependen entre otras cosas de la potencia por unidad de área (potencia específica) aplicada por el láser al material cuando recorre el sustrato y sobre los otros parámetros operativos del láser, la tasa de alimentación de polvo y la velocidad de recorrido. Modular la forma del pulso y/o la duración proporciona un medio para controlar la potencia específica para una tasa de recorrido dada. Modulando el uso de haz láser durante un recorrido, el grosor de la capa depositada durante ese recorrido puede ser variado. Esto puede dar como resultado la disminución del tiempo de fabricación comparado con un método en el que el grosor de la capa es constante y se consigue un perfilado vertical depositando una capa solamente durante parte del recorrido.

30 La modulación durante el recorrido permite también que las superficies laterales de la estructura en capas sean perfiladas o diseñadas, ya sea para proporcionar un refuerzo estructural, o con propósitos decorativos o de otro modo. Esto se consigue controlando la temporización de los eventos de modulación correspondientes en recorridos sucesivos de formación de capas del haz láser: repetir eventos de modulación en los mismos momentos durante cada recorrido dará lugar a características que se extienden verticalmente (ortogonalmente al sustrato) mientras que avanzar o retrasarlos con relación a los eventos correspondientes del recorrido previo da como resultado características inclinadas en el sustrato hacia atrás o hacia delante con relación a la dirección de movimiento del haz láser que se desplaza.

40 El material en polvo puede ser entregado al punto de aplicación del láser al objeto (el "punto de láser") a una tasa relacionada con la potencia del haz láser.

El método puede ser repetido al menos una vez de modo que forme al menos una capa adicional sobre la parte superior de una capa formada previamente.

45 Un problema que hemos encontrado en algunos casos de fusión selectiva por láser es el de la excesiva distorsión del sustrato comparado con lo que ocurre cuando se utiliza una potencia de láser de CW.

50 En la fusión selectiva por láser, el haz láser crea un depósito de material de soldadura en el que se deposita el material en polvo, de una manera similar a aquella en la que un soldado añade manualmente alambre de aportación a un depósito de soldadura creado en procesos de soldadura por arco eléctrico convencionales pero a una escala mucho menor. Durante la formación de las capas iniciales sobre el sustrato, el sustrato es así sometido a un calentamiento localizado intenso, creando gradientes térmicos elevados entre el material fundido y el material frío más alejado. Si las tensiones de compresión transversales causadas por el material en expansión muy caliente exceden del límite de elasticidad del material entonces ocurrirá un límite elástico por deformación plástica por compresión (CPY) en el material circundante. Al enfriarse y contraerse se crearán elevadas tensiones residuales transversales de tracción a través de la "soldadura" y éstas serán equilibradas por tensiones residuales compresivas más alejadas. Estas tensiones residuales

compresivas son las que causan la distorsión por pandeo cuando exceden de la carga de pandeo crítica (CBL) del sustrato. La distorsión por soldadura y la generación de tensión residual se han descrito por ejemplo por Rajad, D. "Heat effects of Welding" – Temperature Field, Residual Stress, Distortion", Springer-Verlag, Berlin (1992).

5 Por consiguiente, la invención proporciona en un primer aspecto un método para fabricar un objeto, incluyendo el método las operaciones de aplicar calor mediante un haz láser a material en polvo para crear por ello un depósito local de material fundido de modo que funda el material en polvo y cree una capa sobre un sustrato, y repetir la operación anterior cuando sea necesario para acumular un apilamiento de capas unas sobre las otras, caracterizado por que la operación de crear una o más de dichas capas más cerca del sustrato es llevada a cabo siendo aplicada una potencia específica más elevada al láser que para la operación de crear las capas alejadas del sustrato para crear por ello una o más capas más gruesas más cerca del sustrato y más delgadas más alejadas del sustrato y reducir por ello la distorsión en el sustrato.

15 Hemos encontrado que la distorsión puede ser reducida si las capas más próximas al sustrato son formadas más gruesas que las más alejadas del mismo, de modo que se necesiten menos recorridos del láser para establecer una base para la estructura fabricada. Esto reduce el número de veces en que el sustrato es calentado hasta una magnitud que da origen a la distorsión. Por consiguiente, cuando al menos una capa formada previamente es adyacente o está próxima sustrato, puede ser formada para que sea más gruesa que al menos una capa más alejada, para reducir por ello la distorsión del sustrato.

20 Dichas capas más delgadas son formadas aplicando calor por medio de un láser pulsado. Preferiblemente, dichas capas más gruesas son formadas aplicando calor por medio de un láser de onda continua. Alternativamente las capas más gruesas pueden ser formadas por otro método que funda una mayor cantidad de material en polvo en una sola pasada por ejemplo aumentando la potencia de pico y/o el ciclo de trabajo de un láser modulado en pulsos y/o reduciendo la velocidad de recorrido. Cualquiera que sea el método utilizado, debe tenerse cuidado desde luego de manera que el suministro de polvo se haga en una tasa adecuada para la capa más gruesa que ha de ser formada.

25 Al menos la capa más gruesa puede ser tal que la formación de capas más delgadas subsiguientes no den como resultado una deformación material del sustrato.

30 Un segundo aspecto de la invención proporciona un aparato de fabricación por adición de capas sucesivas para fabricar un objeto, comprendiendo el aparato una placa base para soportar un objeto sobre el que pueden ser acumuladas sucesivas capas de material, un sistema de entrega de polvo para entregar polvo a la proximidad de un punto láser sobre una superficie del objeto, un láser adaptado para entregar un haz láser al punto láser, estando adaptado el láser para poderse mover con respecto a un sustrato, y un ordenador, caracterizado por que el ordenador está programado para modular la potencia específica aplicada al láser para aplicar por ello una potencia específica mayor para formar capas más cerca del sustrato y una potencia específica menor para formar capas más alejadas del sustrato.

Un tercer aspecto de la invención proporciona un programa de ordenador que cuando está instalado y es ejecutado realiza, sobre el aparato del segundo aspecto, un método de acuerdo con el primer aspecto.

35 La invención será descrita a continuación simplemente a modo de ejemplo con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

La fig. 1 muestra un aparato para implementar el método de la invención.

La fig. 2 muestra formas de onda de un haz láser producidas en el aparato de la fig. 1.

La fig. 3 muestra estructuras fabricadas por medio de la invención.

40 Las figs. 4 y 5 ilustran experimentos realizados para demostrar la invención, y

La fig. 6 muestra piezas de ensayo fabricadas en los experimentos.

45 Con referencia a la fig. 1, un aparato para fundir de manera selectiva por láser comprende una placa base 10 configurada para recibir un objeto o pieza de trabajo que comprende una placa padre o sustrato 12 sobre el que se acumulan sucesivas capas de material 14, 16, 18, 20, 22 como se ha descrito a continuación. Un generador 24 de láser es controlado por un ordenador 26 para entregar un haz láser a través de una fibra óptica 28 a ópticas 30 de enfoque convencionales, que enfocan el haz láser a un punto 34 sobre la superficie de la pieza de trabajo. Un sistema 32 de entrega de polvo (también conocido per se) entrega polvo en la proximidad del punto 34 de láser sobre la superficie de la pieza de trabajo. El sistema de entrega comprende tres conductos 36 (solamente se han mostrado dos) dispuestos a intervalos de 120° alrededor del punto láser.

50 El aparato láser 28, 30 está montado de modo que pueda moverse bajo el control del ordenador 26 en el plano X-Y paralelo a la superficie de la placa base, y verticalmente en la dirección Z ortogonal a ella. El punto láser 34 puede así ser dirigido a cualquier punto en la envolvente de trabajo en el plano X-Y, y verticalmente de modo que aloje piezas de trabajo de diferente altura, y regiones de diferente altura dentro de las piezas de trabajo. Como se ha ilustrado en la

figura, la dirección transversal es en la dirección de la fecha 38, estando el aparato en el proceso de fabricación de la capa 22.

El aparato láser 24 es un láser Nd:YAG que funciona a una longitud de onda de 1064 nm, y que tiene una salida de potencia de CW de 500 W. El ordenador 26 está programado para controlarlo bien en el modo CW o bien en un modo pulsado.

En un experimento, el aparato fue utilizado con el láser funcionando en modo pulsado para producir una estructura por adición de capas sucesivas. El sustrato 12 era una placa de acero inoxidable 316L de 100 mm x 70 mm x 1,5 mm de grosor. El material en polvo era acero inoxidable 316L. Los parámetros operativos fueron los siguientes:

	Potencia láser promedio	250 W (= potencia láser máxima x tasa de repetición x duración del pulso)
10	Potencia láser máxima	500 W
	Tasa de repetición del pulso	10 Hz
	Duración del pulso	50 ms
	Tamaño de punto láser	600 μm de diámetro
	Tasa de recorrido	5 mm/s
15	Tasa de alimentación de polvo	5 g/min

La potencia láser promedio y la tasa de alimentación de polvo fueron mantenidas constantes a lo largo de todo el experimento.

La fig. 2(a) muestra la salida de potencia del láser pulsado. En un solo recorrido, el aparato produjo una capa fundida de material sobre la superficie del sustrato de un grosor sustancialmente constante de aproximadamente 40 μm .

En la fig. 2(b), se ha mostrado una forma de onda de salida láser modulada en pulso en la que periódicamente (durante 300 ms en cada segundo) la potencia promedio del láser es incrementada desde 250 W a 500 W. En otras palabras el ciclo de trabajo de cada pulso es incrementado desde 50% al 100%. Durante estos períodos una mayor cantidad de material es fundida por el láser sobre el sustrato, dando como resultado una capa más gruesa. La tasa de alimentación del polvo o bien es incrementada para abastecer esta demanda incrementada, o alternativamente se alimenta polvo a la máxima tasa requerida en cualquier instante durante el recorrido, y el polvo en exceso es recogido y reutilizado.

En el aparato experimental, los pulsos de láser eran nominalmente de forma triangular, como se ha mostrado en la fig. 2. Otras formas de pulso pueden ser utilizadas, por ejemplo una forma de onda cuadrada, siendo controlada entonces la potencia del láser modulando la relación marca/espacio (duración de activado/desactivado) de los pulsos dentro del periodo de repetición de pulso.

Las figs. 3a a 3d muestran algunas fabricaciones por adición de capas sucesivas producidas por medio de la invención. La fig. 3a muestra una estructura a modo de valla, cuyas superficies laterales (verticales) exhiben un patrón de tejido de cesta. La fig. 3b muestra una estructura cilíndrica en la que los lados exhiben un patrón helicoidal. La fig. 3c muestra otra estructura a modo de valla, en la que las superficies laterales tienen un patrón en zigzag o en espiguilla. Finalmente, la fig. 3d muestra una valla con patrón como material tejido enhebrada entre postes intermedios. Estos patrones detallados de manera fina son conseguidos por medio de la resolución lineal que se puede obtener en la dirección transversal. Por ejemplo en la fig. 2, una tasa de repetición de pulso de 10 Hz y una velocidad de recorrido de 5 mm/s implica una tasa de alimentación de 0,5 mm/pulso. Una velocidad de recorrido de 2 mm/s produce una tasa de alimentación de 0,2 mm/pulso que permitiría que un patrón más fino sea resuelto en el producto fabricado. Para un grosor constante de capa, la potencia del láser es reducida proporcionalmente a la tasa de alimentación. La variación en anchura (transversalmente a la dirección de recorrido) de la estructura acumulada puede ser conseguida aumentando tanto el ciclo de trabajo de pulso como el tamaño de punto de láser simultáneamente, de manera que la capa depositada es más ancha pero no es más gruesa.

Alternativamente puede conseguirse con un tamaño constante de punto de láser aumentando el "tiempo de interacción" del láser. El tiempo de interacción es el tiempo durante el cual el punto láser es incidente sobre un área de la pieza de trabajo, y para una potencia de láser dada y un área de punto es una medida de la potencia específica (energía por unidad de área por unidad de tiempo aplicada a la pieza de trabajo) mencionada anteriormente. Aumentar la potencia específica bien aumentando el tiempo de interacción o bien la potencia del láser, da como resultado un punto de soldadura más ancho, que a su vez permite que se admita más polvo. Así puede conseguirse un depósito de material más ancho.

Formaciones sustancialmente más anchas, por ejemplo los 'postes' en la fig. 3(d) pueden ser fabricadas por múltiples recorridos en los que láser es operado solamente de manera transitoria donde se requiere que un poste sea acumulado.

Patrones sobre las superficies laterales de la estructura tal como en las figs. 3(a) y 3(c) son conseguidos retrasando o avanzando los eventos de modulación correspondientes en pasadas sucesivas. Avanzar cada evento da como resultado ligeramente un patrón inclinado hacia atrás con relación a la dirección de recorrido (asumiendo que pasadas sucesivas están en la misma dirección). Retrasar cada evento proporciona un patrón inclinado hacia adelante.

- 5 La fig. 4 muestra una serie de experimentos realizados para demostrar la distorsión que se produce durante la función selectiva por láser, y la mejora que puede ser obtenida con un aspecto de la presente invención.

10 En cada experimento, una placa de muestra 40 de acero inoxidable 316L de 100 mm x 70 mm x 1,5 mm de grosor fue sujeta en un extremo a un soporte 42 sobre la placa base 10 del aparato de la fig. 1. El otro extremo de la placa de muestra fue soportado pero no sujeto a un soporte 44. Una estructura 46 de fabricación por adición de capas sucesivas que comprende varias capas superpuestas fue formada sobre la placa utilizando polvo de 316L por medio del aparato de la fig. 1. El experimento fue realizado utilizando bien potencia de láser de onda continua o bien potencia de láser modulado en pulso. Los parámetros operativos fueron:

Modo CW

15	Potencia láser	250 W
	Tamaño de punto	600 µm de diámetro
	Tasa de recorrido	5 mm/s
	Tasa de alimentación de polvo	5 g/min

Modo modulado en pulso

20	Potencia promedio	250 W
	Potencia máxima	500 W
	Tasa de repetición	10 Hz
	Duración de pulso	50 ms
	Tamaño de punto	600 µm de diámetro
	Tasa de recorrido	5 mm/s
25	Tasa de alimentación de polvo	5 g/min

El experimento fue realizado cuatro veces, formando estructuras fabricadas por adición de capas sucesivas de material fundido como sigue:

- a) Se acumularon 10 capas a una altura de 2 mm utilizando potencia láser de CW (fig. 5a)
- b) Se depositaron 50 capas a una altura de 2 mm utilizando potencia láser pulsada (fig. 5b)
- 30 c) Se depositaron 5 capas utilizando potencia láser de CW seguido por 25 capas utilizando potencia láser pulsada a una altura total de 2 mm (fig. 5c)
- d) Se depositaron 25 capas utilizando potencia láser pulsada seguida por 5 capas utilizando potencia láser de CW, a una altura total de 2 mm (fig. 5d).

35 La fig. 6 muestra los resultados de los cuatro experimentos. En el experimento (a), el uso solo de potencia de láser de CW dio como resultado la distorsión del borde libre del sustrato 40 de 5 mm (fig. 6a). El uso solo de potencia de láser pulsada (experimento (b), fig. 6 (b)) dio como resultado una distorsión mucho mayor de 14 mm. Se ha pensado que se pueda deber a la mayor entrada de calor total al sustrato debido al mayor número de capas delgadas depositadas utilizando la técnica del láser pulsado. En contraste, la acumulación de la estructura inicialmente mediante el uso de potencia de láser de CW en el experimento (c), fig. 6c dio como resultado una distorsión de 4,7 mm, aproximadamente la misma que en el experimento (a). Construir la estructura en primer lugar mediante potencia de láser pulsada seguida por potencia de láser de CW (experimento (d), fig. 6d) dio como resultado tanta distorsión como lo hizo el uso solo de potencia de láser pulsada en el experimento (b).

45 Estos experimentos sugieren que para reducir la distorsión es ventajoso comenzar la construcción de una estructura ALF utilizando potencia de láser de CW, y luego continuar con potencia de láser pulsado para obtener las ventajas de precisión y acabado superficial descritas anteriormente. Parece como una "altura de construcción umbral" (TBH) anterior que el uso de potencia de láser pulsado no aumenta la distorsión: en el caso del experimento (c) cinco capas de CW de grosor total de aproximadamente 1 mm fueron suficientes, lo que sugiere que la TBH en este caso estaba en o por

5 debajo de ese grosor. Debido a que las condiciones de cada fabricación por adición de capas sucesivas son específicas de esa fabricación es necesario determinar la TBH por experimento o por referencia a otras fabricaciones similares. El principio de guiado es que cuando se consigue la TBH, el calor procedente del punto láser es distribuido en la estructura fabricada y así no se concentra sobre una pequeña área del sustrato. El límite elástico por deformación plástica por compresión y las subsiguientes tensiones residuales y distorsión pueden así ser evitados o reducidos. Desde luego, las tensiones residuales pueden ser reducidas además mediante recocido u otro tratamiento por calor después de que se haya efectuado la fabricación por adición de capas sucesivas.

10 Aunque la invención ha sido descrita con referencia a la variante de ALF de fusión selectiva por láser, es aplicable también a otros métodos ALF tales como la sinterización selectiva por láser, en la que la entrada de calor al polvo suficiente para fundir partículas individuales juntas pero no es suficiente para formar un depósito fundido de material. En esas variantes, la magnitud de distorsión puede ser reducida y la fabricación de capas de CW preliminares puede no ser necesaria.

15 Además, aunque se ha descrito con referencia a un material metálico en polvo, pueden utilizarse otros materiales en polvo fusibles con parámetros operativos apropiados para esos materiales como será bien conocido por los expertos en la técnica. Ejemplos de tales polvos son mezclas de vidrio o fibra de carbono o partículas metálicas (por ejemplo aluminio, titanio o acero) mezclados con poliimida, poliestireno u otros polímero termoplásticos, o piedra arenisca de color verde.

20 Pueden conseguirse características en una estructura construida que se extienden significativamente en una dirección que no es perpendicular a la placa madre o sustrato soportando la pieza de trabajo sobre un manipulador o mesa de múltiples ejes de manera que su orientación con relación al eje del láser (vertical) pueda ser ajustada. Por ejemplo para construir la característica que se extiende a 60° con la placa madre, la propia placa debe ser ajustada a 60° con el eje del láser.

25 Se apreciará que el propósito subyacente de utilizar inicialmente potencia de láser de CW es aumentar la potencia específica aplicada al láser y por tanto la tasa a la que el material en polvo se funde en una capa sobre el sustrato produciendo por ello una capa más gruesa en una sola pasada. Esto no requiere intrínsecamente potencia de CW: el mismo efecto puede ser conseguido aumentando la potencia de pico de un láser pulsado, o aumentando el ciclo de trabajo de sus pulsos, o reduciendo la tasa de recorrido.

30 También se apreciará que la técnica de reducción de distorsión puede ser aplicada de manera independiente al uso de un láser pulsado: puede ser útil siempre que haya de ser fabricada una estructura acumulando capas delgadas mediante un método en el que el calor se aplicaron repetidamente mediante láser en los muchos recorridos daría como resultado de otro modo una distorsión excesiva como ya se ha descrito. Desde luego este método alternativo de fabricar estructuras de múltiples capas puede no producir la exactitud, capacidad de control o acabado superficial que se puede obtener por el uso del láser pulsado.

REIVINDICACIONES

1 Un método para fabricar un objeto (12, 14, 16, 18, 20, 22), incluyendo el método las operaciones de:

a) aplicar calor por medio de un haz láser a material en polvo para crear por ello un pozo local de material fundido de modo que funda el material en polvo y cree una capa (14) sobre un sustrato (12), y

5 b) repetir la operación anterior cuando sea necesario para acumular un apilamiento de capas (14, 16, 18, 20, 22) una sobre la parte superior de la otra.

10 caracterizado por que la operación de crear una o más de dichas capas más cerca del sustrato es llevada a cabo aplicando una potencia específica mayor al láser (24, 28, 30) que para la operación de crear las capas más alejadas del sustrato, para crear por ello una o más capas más gruesas cerca del sustrato y capas más delgadas lejos del sustrato y por ello reducir la distorsión en el sustrato.

2. El método de la reivindicación 1, en el que las capas más delgadas son formadas aplicando calor por medio de un láser pulsado.

3. El método de la reivindicación 1 o 2, en el que la operación de aplicar una potencia específica mayor al láser es llevada a cabo aplicando calor por medio de un láser de onda continua.

15 4. El método de la reivindicación 1 o 2, en el que la operación de aplicar una potencia específica mayor al láser es llevada a cabo aumentando la potencia de pico de un láser pulsado a partir de la que es usada para formar las capas más delgadas.

20 5. El método de la reivindicación 1 o 2, en el que la operación de aplicar una potencia específica mayor al láser es llevada a cabo aumentando el ciclo de servicio de pulsos de un láser pulsado a partir de un ciclo de trabajo utilizado para formar las capas más delgadas.

25 6. Aparato de fabricación para fabricar un objeto (12, 14, 16, 18, 20, 22), comprendiendo el aparato un ordenador (26) una placa base (10) para soportar un objeto sobre el que pueden ser acumuladas capas sucesivas (14, 16, 18, 20, 22) de material, un sistema (32) de entrega de polvo para entregar polvo a la proximidad de un punto (34) láser sobre una superficie del objeto, un láser (24, 28, 30) adaptado para entregar un haz láser al punto láser, estando el láser montado de manera que pueda moverse bajo el control del ordenador en el plano X-Y paralelo a la superficie de la placa base, y verticalmente en la dirección Z ortogonal a ella, caracterizado por que el ordenador está programado para modular la potencia específica aplicada al láser para aplicar por ello una potencia específica mayor para formar capas más cerca del sustrato y una potencia específica menor para formar capas más lejos del sustrato.

30 7. Un programa de ordenador que cuando es instalado y ejecutado hace que el aparato de fabricación de la reivindicación 6 realice el método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5.

Fig.1.

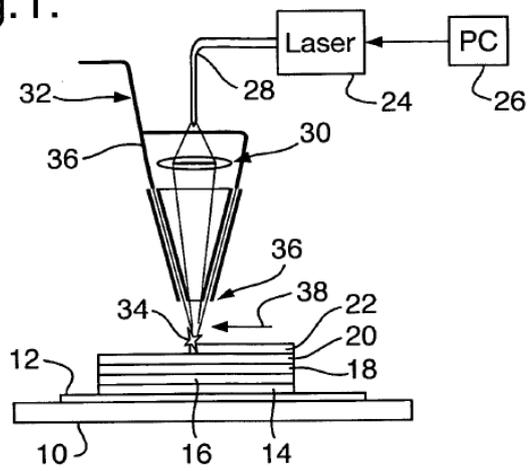


Fig.2(a).

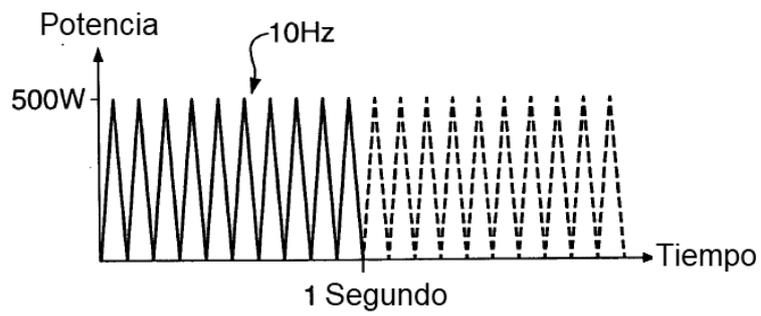


Fig.2(b).

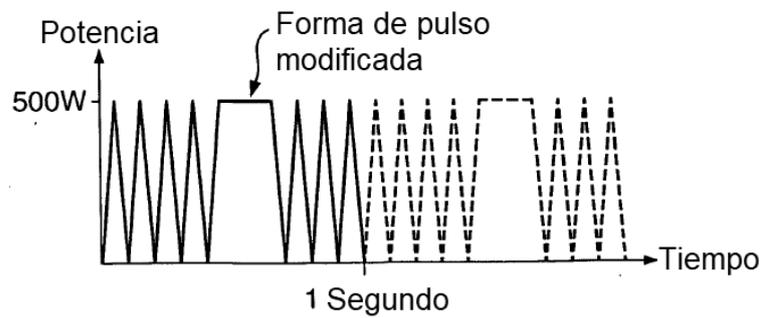


Fig.3(a).

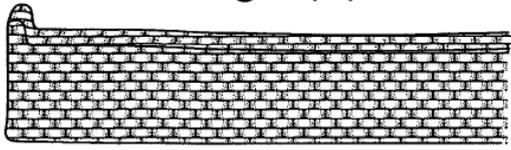


Fig.3(b).

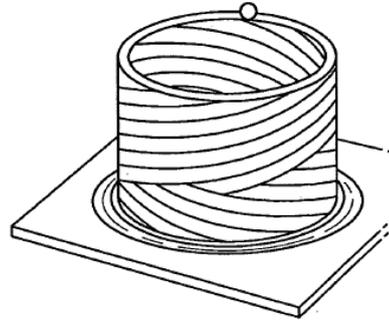


Fig.3(c).

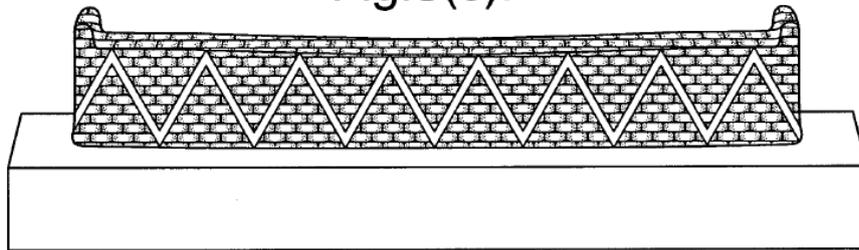


Fig.3(d).

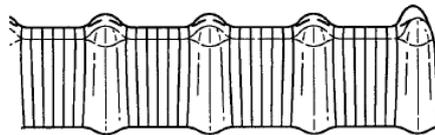


Fig.4.

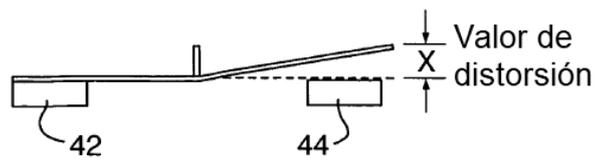
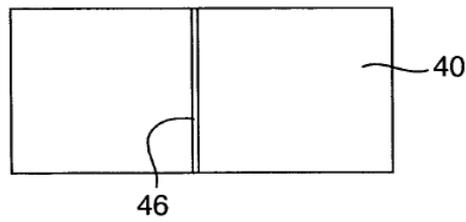


Fig.5(a).

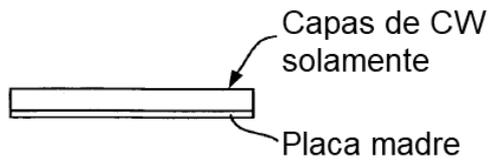


Fig.5(b).

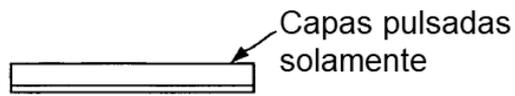


Fig.5(c).

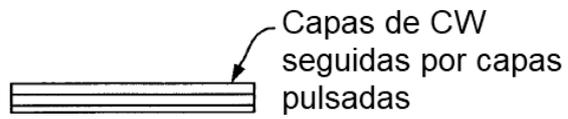


Fig.5(d).



Fig.6(a).

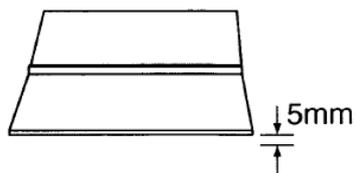


Fig.6(b).

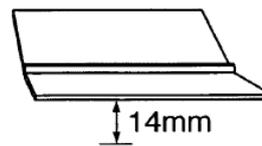


Fig.6(c).

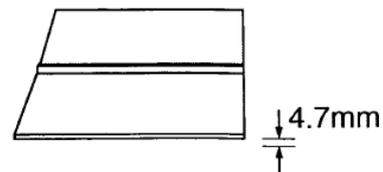


Fig.6(d).

