

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 989 689**

51 Int. Cl.:

H01J 37/304 (2006.01) **B33Y 50/02** (2015.01)

H01J 37/305 (2006.01)

B22F 10/28 (2011.01)

B22F 10/31 (2011.01)

B22F 10/36 (2011.01)

B22F 10/38 (2011.01)

B22F 10/85 (2011.01)

B22F 12/90 (2011.01)

B33Y 10/00 (2015.01)

B33Y 30/00 (2015.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.03.2016 PCT/EP2016/055456**

87 Fecha y número de publicación internacional: **15.09.2016 WO16142552**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.03.2016 E 16715463 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.09.2024 EP 3268153**

54 Título: **Método de control de calidad para regular la operación de un aparato electromecánico, por ejemplo, un aparato de EBM, con el fin de obtener productos procesados certificados**

30 Prioridad:
12.03.2015 IT MI20150378

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
27.11.2024

73 Titular/es:
**LIMACORPORATE S.P.A. (100.0%)
Via Nazionale ,Villanova
33038 San Daniele Del Friuli (UD), IT**

72 Inventor/es:
**PRESSACCO, MICHELE y
REGIS, MARCO**

74 Agente/Representante:
ARIAS SANZ, Juan

ES 2 989 689 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 control de calidad para regular la operación de un aparato electromecánico, por ejemplo, un aparato de EBM, con el fin de obtener productos procesados certificados

Campo de aplicación

5 La presente invención se refiere a un método para regular la operación de un aparato electromecánico, que es un aparato de EBM, con el fin de obtener productos procesados certificados.

Más particularmente, la invención se refiere al campo de las técnicas y tecnologías de fabricación aditiva. Más específicamente, la presente invención cae dentro del ámbito de la fabricación de objetos tridimensionales partiendo de modelos 3D informatizados, en el campo de fabricación aditiva usando la tecnología de Fusión por Haz de Electrones (EBM).

Aún más particularmente, la invención se refiere a un método de validación del proceso de EBM para permitir calificar y certificar la funcionalidad correcta de un aparato o sistema de EBM y de los productos relacionados obtenidos con el mismo.

Técnica anterior

15 La tecnología de EBM (Fusión por Haz de Electrones) permite crear objetos o componentes semiterminados partiendo directamente de polvos metálicos usando un haz de electrones enfocado según los principios de las tecnologías de fabricación aditiva (también llamada "fabricación aditiva"). Esta tecnología se describe por ejemplo en la solicitud de patente PCT N° WO2011/008143 de la empresa sueca Arcam. Los aparatos de EBM generalmente tienen una unidad de alto voltaje que alimenta un cañón de electrones adaptado para generar un haz de electrones que se transporta en el interior de una cámara de trabajo. Todo el conjunto se controla por medios programables adecuados. La tecnología de EBM usa este haz de electrones para sinterizar una cantidad predeterminada de polvo que se extrae de depósitos dedicados y distribuidos en un área de trabajo del aparato de EBM.

25 En el interior de la cámara de trabajo, el proceso de producción implica colocar en vacío las capas de polvo del material a ser derretido. Trabajar en vacío también permite trabajar sobre materiales que de otro modo reaccionarían inmediatamente con el oxígeno del aire, produciendo de este modo compuestos indeseables.

El proceso que se implementa dentro de un aparato de EBM incluye tres pasos, que se pueden esquematizar de la siguiente manera:

1. Un primer paso de entrada que comprende:

30 Introducir o cargar archivos acerca de los componentes a ser fabricados para accionar los medios programables dedicados a la fabricación de los productos;

Insertar los polvos metálicos en el interior de la cámara de trabajo.

2. Un segundo paso de fusión, que implica: - Ajustar la configuración y los parámetros de control de los componentes de software y hardware del aparato de EBM;

Formar el vacío en la cámara de fusión;

35 Fusión EBM real;

3. Un tercer paso de salida final, que obtiene el producto terminado. La configuración de la máquina es de primordial importancia, tanto en términos de componentes de hardware como en términos de aplicaciones de software que regulan la ejecución del proceso.

40 Para comprender mejor los aspectos de la presente invención, es importante tener en mente que los electrones del cañón de electrones se producen alimentando un filamento de tungsteno con un alto potencial, generado por una unidad de alto voltaje (unidad de HV). Además, con el fin de que sea eficaz, es necesario que el haz de electrones se genere en condiciones de vacío absoluto, con el fin de evitar fenómenos de interacción de los electrones con las moléculas de la atmósfera.

45 También es esencial que estas condiciones se puedan mantener con estabilidad con el fin de permitir la correcta ejecución del proceso de fusión y repetir procesos de fusión posteriores con garantía de calidad y estabilidad en la producción.

Más específicamente, la estabilidad del proceso está garantizada por ciertos parámetros fundamentales: a) la corriente del filamento, que cuantifica la energía cinética de los electrones emitidos y la consiguiente potencia/velocidad del haz de electrones; b) el grado de vacío del entorno de generación del haz de electrones, tanto en el cañón de electrones como en la cámara de fusión; c) el movimiento del recogedor/distribuidor, es decir, el

dispositivo destinado a recoger y distribuir la cantidad correcta de polvo, para obtener una capa uniforme para el paso de fusión; d) la composición o el tema, es decir, el conjunto de información que contiene la configuración y los parámetros de gestión del haz de electrones que regula la energía del haz de electrones según las operaciones a ser realizadas usando el haz de electrones; estas operaciones incluyen, para cada proceso de fusión de las capas de polvo, los siguientes pasos:

- calentamiento de polvo,
- fusión de contorno,
- partes sólidas,
- estructuras de red.

10 e) movimiento de la bandeja desplazadora, que descendiendo asegura el desarrollo y la realización de los productos sinterizados;

15 f) temperatura de la plataforma o placa de trabajo (llamada placa de inicio), medida constantemente para comprobar que la temperatura de fusión de los polvos es constante y conduce a la generación de una fusión uniforme desde el punto de vista microestructural. De hecho, la correcta operación del haz de electrones se controla y regula leyendo la temperatura de la placa de inicio.

20 El proceso de EBM se completa usando algunas unidades auxiliares necesarias para la recirculación y reutilización de la materia prima (es decir, polvos), y para el tratamiento post-proceso de los productos y componentes sinterizados (por ejemplo, la limpieza de los mismos de polvos no agregados). El aparato de EBM está provisto de algunos componentes auxiliares importantes, tales como un aparato llamado Vacío Controlado (CV) que regula el nivel de vacío mediante la introducción controlada de pequeñas cantidades de gas inerte dentro de la cámara, y un software de aplicación de interfaz que asegura la integración y el funcionamiento de todas las partes de la máquina. Es evidente que un aparato de EBM es un sistema electromecánico complejo en el que existen unidades auxiliares necesarias para el movimiento de los componentes del sistema y la materia prima (polvos), así como para el procesamiento posterior de los productos fabricados y para el mantenimiento de todo el aparato.

25 Por ejemplo, la medición de la cantidad de polvo distribuido en el paso (c) se controla leyendo dos sensores colocados a los lados de la placa de inicio.

30 En su lugar, como parte del paso (d), los parámetros de la composición o tema son responsables de ajustar la energía que debe tener el haz de electrones con el fin de optimizar el proceso de fusión, por ejemplo, en términos de velocidad del haz de electrones o paso de corriente a ser entregada al filamento. De hecho, para que el proceso de fusión sea óptimo y permita la máxima flexibilidad en términos de geometrías que se pueden hacer, el paso del haz de electrones debe ser modulable con precisión solamente dentro de áreas predeterminadas para la realización de líneas de fusión particulares.

Las operaciones de movimiento y modulación del haz de electrones se llevan a cabo a través el uso de bobinas magnéticas colocadas a los lados de la columna que transportan los electrones a la cámara de EBM.

35 También en lo que respecta a los pasos (e) y (f), con el fin de lograr las geometrías deseadas de los productos a ser sinterizados, además de mover adecuadamente el haz de electrones y modular su energía para permitir una transferencia de energía correcta al polvo, la temperatura de la capa derretida se debería mantener constante para lograr productos uniformes desde el punto de vista de su densidad estructural y sus propiedades físico-químicas-mecánicas.

40 Además, también el volumen del material a ser derretido afecta a la densidad y las características de los productos obtenidos, y diferentes volúmenes a ser derretidos requieren diferentes energías. Por eso es por lo que también se debe controlar y debe ser constante la cantidad correcta de polvo distribuido en la placa de inicio.

45 Obviamente, el fabricante del aparato de EBM proporciona las especificaciones básicas de referencia que ilustran el modo de ejecución de las operaciones desde el inicio del proceso para continuar con el postprocesamiento y el mantenimiento del sistema; todo en un manual dedicado y con cursos de formación.

50 Actualmente, los sistemas de EBM tiene el marcado CE requerido, como cualquier otro producto, para su introducción dentro del mercado europeo. Este proceso de certificación CE implica un procedimiento de instalación y una calificación de maquinaria. No obstante, aunque la funcionalidad del sistema se garantiza inicialmente por el fabricante y verifica en la primera instalación, falta por completo una calificación y certificación de la funcionalidad del proceso de EBM durante las operaciones, esto es, durante muchos pasos de procesamiento que se llevan a cabo cada vez. El impacto de un mal funcionamiento de una o más partes del sistema no se puede discernir actualmente, ni siquiera a posteriori por terceros; además, algunas veces faltan algunos procedimientos de control de las partes del sistema en la documentación proporcionada por el fabricante y también se desconocen las consecuencias de

una calibración o configuración del sistema errónea en términos de aceptabilidad del material producido, es decir, ausencia de defectos y/o la correcta fabricación del producto diseñado.

5 Las deficiencias anteriores pueden conducir a algunas desviaciones del proceso durante el paso de fusión real que, si no se calibran correctamente usando pruebas de verificación y ajustes costosos y repetidos de la máquina, pueden dar como resultado la creación de productos no conformes.

Las deficiencias en el control de la funcionalidad del proceso pueden conducir a los siguientes efectos:

- alto porcentaje de residuos en la producción;

- aumento de costes y tiempos de fabricación;

10 - necesidad de un control frecuente y constante de todos los productos sinterizados; este control también es a menudo difícil y laborioso debido a la libertad constructiva extrema que permiten los sistemas de EBM;

- necesidad de adoptar tratamientos de recuperación post-fusión de EBM capaces de mitigar algunos defectos de fabricación, tales como el HIP (Prensado Isostático en Caliente).

15 Todo esto representa un gran inconveniente en términos de productividad que se puede obtener con esta tecnología de fabricación, pero también para su aplicabilidad en áreas en las que respetar la calidad de producción es de fundamental importancia (por ejemplo en el campo médico, aeroespacial, etc.).

Con el fin de limitar las consecuencias de estos inconvenientes, el fabricante del sistema de EBM solamente ha proporcionado un protocolo de validación del aparato inicial, vinculándolos a un conjunto específico de configuraciones de la máquina.

20 Aunque en muchos sentidos son ventajosos y susceptibles de mejorar la calidad del proceso en términos de buena calidad de los productos fabricados, estos expedientes sugeridos por el fabricante no permiten remediar las desviaciones de los sistemas de EBM.

Paradójicamente, las verificaciones de la correcta calibración y configuración de los parámetros del aparato y sus partes componentes también están sometidas a desviaciones hasta el punto de que estas desviaciones afectan a la calidad de los productos obtenidos, especialmente en el campo médico.

25 Por lo tanto, en la actualidad, estos aspectos permanecen indefinidos y se desconoce el saber hacer (know-how) en la base de algunos pasos operativos del aparato, por ejemplo: la conexión entre el cambio de los parámetros y el efecto técnico sobre la máquina y sobre el material producido aún no está formalizado para el usuario del aparato.

30 La técnica anterior propone una solución, descrita en la solicitud de patente de EE. UU. N° US 2015/017054, para intentar mejorar la calidad de la producción obtenible por medio de un aparato de EMB a lo largo del tiempo. No obstante, esta solución se limita a medir corrientes de Foucault en el producto en desarrollo como el único parámetro de control de calidad, pero no comprueba los parámetros de operación del aparato en sí mismo.

El problema técnico a ser resuelto es el de idear un método para regular la operación de un aparato electromecánico, del cual todos los aspectos individuales estructurales y funcionales de la calibración no se conocen en detalle, por ejemplo, un aparato de EBM, para obtener productos procesados certificados.

35 El método en cuestión debería tener tales características funcionales en cuanto a permitir validar el proceso de fusión de EBM con el fin de calificar y certificar la funcionalidad del mismo de una manera sencilla, eficaz, eficiente y fiable, con un alto grado de seguridad.

40 Otro objeto de la invención debería ser el de cubrir cualquier deficiencia de conocimiento acerca de los efectos de la calibración y de los parámetros del proceso del aparato que permite fabricar los productos tridimensionales a través de la tecnología de EBM.

45 La técnica conocida propone una solución para mejorar con el tiempo la calidad de la producción que se puede obtener mediante un aparato de EBM. Tal solución se describe en la solicitud de patente de EE. UU. N° US 2015/017054. No obstante, esa solución se limita a detectar corrientes de Foucault en el interior del producto en construcción como un único parámetro para detectar la calidad final y no le importa comprobar otros parámetros de funcionamiento del aparato en sí mismo.

El documento "ASTM F3055:14a" (2014) describe una Especificación Estándar para la Fabricación Aditiva de Aleación de Níquel (UNS N07718) con Fusión de Lecho de Polvo.

50 El documento de patente US2015/017054A1 se refiere a un método para producir componentes de manera generativa mediante la construcción capa por capa a partir de un material en polvo mediante la unión de material selectiva de partículas de polvo mediante un haz de alta energía.

El documento "Mechanical Properties of Laser Beam Melting Components Depending on Various Process Errors" de Kleszczynski et al. (2013) se relaciona con un proceso de Fusión por Haz Láser para la producción de componentes metálicos, en donde los errores de proceso se identifican y documentan usando formación de imágenes de alta resolución.

- 5 El documento "Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects" de Monzón et al. (2014) presenta un resumen y revisión de las acciones llevadas a cabo con el objetivo de desarrollar nuevos estándares en Fabricación Aditiva.

- 10 El documento "Influence of selected parameters of Selective Laser Sintering process on properties of sintered materials" de Stwora et al. (2013) se refiere a una investigación sobre la influencia de parámetros de Sinterización Láser Selectiva (SLS), tales como: potencia del láser, distancia del punto, velocidad de barrido y tiempo de exposición sobre la densidad y resistencia a la compresión del material sinterizado.

El documento de patente US6580959B1 se refiere a un método para controlar remotamente la fabricación de un producto depositando capas de material sucesivas a través de un sistema local de deposición directa de material controlado por realimentación y asistido por láser.

- 15 El documento de patente EP2620240A1 se refiere a la formación de un perfil aerodinámico en capas de material depositadas.

El documento de patente US2014/061167A1 se refiere a la fabricación de capas de haz de electrones usando un control de bucle cerrado monitorizado por electrones de barrido.

- 20 El documento "Microstructure, Texture y Mechanical Property Evolution during Additive Manufacturing of Ti6AL4V Alloy for Aerospace Applications" de Alphons Antonyamy (2012) investiga la influencia de las condiciones de procesamiento en la evolución de la microestructura y la textura y su efecto resultante en las propiedades mecánicas durante la fabricación aditiva con una aleación de Ti6Al4V, usando tres técnicas diferentes, esto es; 1) Proceso de fusión láser selectiva (SLM), 2) Proceso de fusión selectiva por haz de electrones (EBSM) y, 3) Proceso de fabricación aditiva por arco de alambre (WAAM).

- 25 El documento de patente US2013/055568A1 se refiere a un método para fabricar un componente en capas de material componente en polvo, el método que comprende derretir y/o sinterizar localmente en capas del material componente suministrando energía con la ayuda de al menos un haz de electrones, en donde la información del material, que caracteriza la topografía del material componente derretido y/o sinterizado, se determina sobre la base de los electrones emitidos.

- 30 En resumen, el problema que subyace a la invención es el de idear un método del tipo anterior y adaptado para permitir una validación del proceso de EBM proporcionando procedimientos de control de todas las partes componentes del aparato, definiendo una calibración y ajuste correctos del aparato en sí mismo y evaluando el impacto de un posible mal funcionamiento de una o más partes, tomando acciones correctivas y evitando de este modo la desviación del proceso de EBM.

35 **Compendio de la invención**

- 40 La idea de solución subyacente a la presente invención es encontrar un método para regular la operación de un aparato electromecánico, tal como un aparato de EBM, con el fin de obtener productos procesados certificados, del tipo en el que se proporciona un paso de calibración inicial, destinado a comprobar el correcto funcionamiento de todas las partes componentes del aparato adaptado para asegurar la funcionalidad completa del mismo, y un paso de control de calidad posterior llevado a cabo sobre los productos obtenidos mediante el proceso de trabajo llevado a cabo; los resultados del control de calidad de los productos obtenidos proporcionan información acerca de posibles desviaciones de los parámetros de proceso predefinidos y operativamente se toman acciones cambiando preferiblemente un único parámetro relacionado que permita restaurar la calidad de la producción a las especificaciones deseadas y esperadas.

- 45 En base a la idea de solución anterior, el problema técnico se resuelve mediante un método para regular la operación de un aparato de EBM para obtener productos procesados certificados, según la reivindicación 1.

Por lo tanto, la invención se define por la reivindicación 1 y las realizaciones preferidas se definen por las reivindicaciones dependientes.

El método comprende:

- 50 - definir una pluralidad de parámetros de medición con relación a dichas partes componentes del aparato;
- medir al menos algunos de dichos parámetros por medio de sensores y/o indicadores de medición acoplados a una unidad de control de aparato y relacionados con dichos parámetros durante al menos una fase de procesamiento realizada por dicho aparato;

- realizar un paso de control de calidad sobre los productos obtenidos después del proceso de trabajo obteniendo datos sobre cualquier desviación de la calidad esperada;

5 - comparar las mediciones detectadas de dichos parámetros y datos sobre cualquier desviación de la calidad esperada con los valores correspondientes de los parámetros de referencia disponibles para ese aparato específico y para esos productos;

- detectar cualquier desviación en uno o más de dichos parámetros o dichos datos con respecto a valores de referencia;

- calcular, sobre la base de tales diferencias, un valor de corrección y regulación total;

10 - aplicar dicho valor de corrección y regulación total a la energía de generación de un haz de electrones de dicho aparato de EBM o a otras partes del sistema.

La energía de generación del haz de electrones se obtiene de fórmulas para correlacionar los parámetros asociados con las partes componentes del aparato, tales como:

$$T \propto \frac{E}{A}$$

$$E \propto t \cdot I \cdot V$$

donde:

15 T es la temperatura de la capa derretida;

E es la energía aplicada al haz de electrones;

A es el área de fusión;

t es el tiempo de la fusión;

I es la corriente del filamento de correlación del haz de electrones; y

20 V el potencial a través del filamento.

Además, la unidad de control de aparato es capaz de calcular sobre la base de dichas fórmulas, y por medio de un procedimiento automatizado, el tipo de energía a aplicar al haz de electrones para realizar productos procesados correspondientes a un nivel de calidad predeterminado.

25 La regulación de la energía de generación del haz de electrones se lleva a cabo regulando la corriente aplicada al filamento de un cañón de generación electrónica del haz de electrones.

30 Básicamente, el método de la presente invención permite obtener productos semiterminados libres de defectos estructurales por medio de una comprobación primaria del correcto funcionamiento de las diversas partes componentes del aparato (procedimiento de calibración), una comprobación secundaria de la efectividad operativa del proceso en sí mismo (procedimiento de calificación operativa) en base a un control de calidad específico de los productos obtenidos. Se proporciona una comprobación final adicional de la estabilidad y repetibilidad del proceso dentro de una ventana de proceso (calificación de rendimiento).

Cualquier corrección o compensación correctiva de las derivas del proceso se lleva a cabo preferiblemente cambiando un único parámetro relacionado que, en este caso, está representado por la energía de aplicación del haz de electrones del aparato de EBM.

35 Si los resultados de las comprobaciones indican que solamente un parámetro específico tiene una deriva, por ejemplo, un parámetro relacionado con una parte estructural y mecánica del aparato, es posible intervenir solamente sobre esa parte estructural con una recalibración directa.

40 De esta forma, la productividad del sistema de EBM se mejora significativamente en términos de reducción de incumplimientos debidos a ajustes y/o calibraciones incorrectos del sistema, con la consecuente disminución de los costes de producción, se define una ventana de proceso dentro de la cual se respetan y no se cambian las características fundamentales del material fabricado y se hace certificable el proceso y la producción de componentes usando esta tecnología según las regulaciones actuales, por ejemplo, en el campo de la calidad en el campo médico.

45 La invención comprende rasgos adicionales y opcionales, tomados individualmente o en combinación, si es necesario.

Según la invención que se define por la reivindicación 1, el paso de definir la pluralidad de parámetros de medición con relación a las partes componentes del aparato se modifica con el progreso de la vida útil del aparato y también después de la aplicación de dicho valor de corrección y regulación total.

5 Además, el paso de medir dichos parámetros proporciona un control de calidad de los productos obtenidos por medio de dicho al menos un procesamiento llevado a cabo.

Tal control de calidad incluye al menos las siguientes pruebas en muestras de producto obtenidas del procesamiento:

- Prueba acerca de la correspondencia dimensional L;

- Pruebas de tracción en la dirección z;

10 - Pruebas de tracción en las direcciones x e y;

- Análisis químico completo;

- Evaluación de porosidad, discontinuidades o micrografía;

- Análisis visual, adhesivo y de compresión de la red estructural.

15 También se debería señalar que la fase de medición de al menos algunos de los parámetros se realiza por medio de sensores y/o indicadores de medición montados en el mismo aparato.

Además, la comparación de las mediciones tomadas a partir de dichos parámetros con los valores correspondientes de los parámetros de referencia se realiza automáticamente mediante una aplicación que reside en la unidad de mando y control de dicho aparato.

20 Las mediciones de dichos parámetros y los valores de los parámetros de referencia se almacenan en una parte de memoria asociada a la unidad de mando y control del aparato.

Rasgos y ventajas adicionales del método de validación del proceso de EBM según la presente invención llegarán a ser evidentes a partir de la siguiente descripción, dada solamente a modo de ejemplo con referencia a los dibujos que se acompañan.

Breve descripción de los dibujos.

25 La figura 1 muestra una vista en bloque esquemática de un aparato electromecánico, tal como un aparato de EBM;

La figura 2 muestra un diagrama de flujo que ilustra esquemáticamente los diferentes pasos de un proceso de fusión implementado por el aparato de EBM en la figura 1;

La figura 3 muestra un diagrama esquemático que ilustra un equilibrio de energía de un paso operativo del proceso de EBM al que se aplica el método de la presente invención.

30 Descripción detallada

Si bien se describe de aquí en adelante una realización particular de la presente invención representada en las figuras relevantes, se debería señalar que la invención no se limita a esa realización particular; por el contrario, aclara varios aspectos de la presente invención mientras que el objeto y alcance de la misma están definidos por el alcance de protección de las reivindicaciones adjuntas.

35 Antes de proceder con la descripción detallada del método según la invención, es necesario comprender la estructura y la operación del aparato electromecánico en el que se implementa el método. En particular, un aparato que opera según la tecnología de EBM y destinado a fabricar productos tridimensionales a partir de polvos metálicos y usando un haz de electrones enfocado según los principios de las tecnologías de fabricación aditiva se describe de aquí en adelante a modo de ejemplo.

40 Con referencia particular a la figura 1, el número de referencia 1 ilustra global y esquemáticamente la estructura de un aparato de EBM para la producción de objetos tridimensionales partiendo de modelos 3D informatizados. En el caso específico, es un sistema de fabricación aditiva que usa la tecnología de Fusión de Haz de Electrones (EBM).

El aparato 1 trata particularmente, pero no exclusivamente, polvos metálicos tales como polvos de titanio o aleaciones del mismo, tales como Ti6Al4V.

45 Se debería señalar que el material metálico del polvo no representa de ninguna forma una limitación de los derechos del Solicitante, así como del ámbito de aplicación (biomédico, aeroespacial, etc.) de los objetos obtenidos mediante el proceso de EBM.

ES 2 989 689 T3

El aparato de EBM 1 comprende una unidad electrónica programable 100 para el mando y control de los pasos operativos del proceso de producción. La unidad electrónica 100 está provista convencionalmente de interfaces de usuario tales como un teclado y un visualizador, no mostradas en los dibujos en la medida que son convencionales.

- 5 La unidad 100 también está provista de una placa de procesamiento de datos provista de un controlador electrónico en comunicación bidireccional con un banco de memoria que puede estar a bordo de la placa en sí misma o asociado de otro modo con la unidad de mando y control 100 o en comunicación con la misma.

También se proporcionan botones de control para la regulación directa de algunas funciones del aparato 1, tales como el paso de arranque o reinicio, o para forzar pasos de regulación operativa predeterminados del ciclo de producción.

- 10 Los medios de alto voltaje HV 12 están conectados a la unidad electrónica 100 para la generación de pulsos de emisión de un haz de electrones, esquematizado en las figuras con el número de referencia 3.

El haz de electrones 3 se genera dentro de un cañón de electrones 2 que, similar a un tubo de rayos catódicos, recibe pulsos de alto voltaje entrantes de los medios de generación 12 y produce el haz de electrones 3 dirigido hacia un plano de trabajo 6.

- 15 Más específicamente, el haz de electrones 3 se emite por un sistema de generación de electrones que incorpora un elemento de cristal o un filamento de tungsteno incandescente (no mostrado en la figura). En cualquier caso, este sistema se alimenta por un alto potencial eléctrico o por una corriente que activa los medios de generación 12. Una boquilla (no mostrada en la figura) colocada debajo del elemento de cristal da forma al haz y lo dirige hacia el plano de trabajo 6.

- 20 Dentro del cañón de electrones 2 hay algunas bobinas electromagnéticas 4 que a su vez están conectadas a la unidad electrónica 100 que manda y controla la energización de las mismas para desviar o, mejor, regular la dirección del haz de electrones 3. De hecho, con el fin de obtener las geometrías deseadas de los productos, el haz de electrones 3 se debe mover adecuadamente y modular usando las bobinas electromagnéticas 4 que lo desvían hasta el punto de impacto.

- 25 El aparato 1 comprende una cámara de procesamiento 5 dentro de la cual el extremo libre del cañón 2 termina, por encima del plano de trabajo 6.

En conjunto, dado que el haz de electrones 3 se debe generar en un alto vacío para evitar fenómenos de interacción de los electrones con las moléculas en la atmósfera, el aparato de EBM 1 comprende además los medios de control de vacío 8.

- 30 La cámara 5 comprende los depósitos 7 y 9 de los polvos metálicos 10 que están dispuestos preferiblemente en lados opuestos con respecto al plano de trabajo 6. Un dispositivo recogedor/distribuidor 11, es decir, un dispositivo destinado a recoger y distribuir la cantidad correcta de polvo 10, se proporciona de manera deslizante a lo largo del plano de trabajo 6 para obtener una capa uniforme para el paso de fusión.

- 35 Los objetos o productos tridimensionales sinterizados por fusión se fabrican en el plano de trabajo 6 partiendo de los polvos metálicos 10 contenidos en los depósitos 7, 9.

Tales polvos 10 se recogen y distribuyen por el dispositivo 11 con el fin de obtener una capa a ser derretida siempre uniforme. Un desplazador de nivel 13 está asociado con los planos de trabajo 6 para regular el desarrollo y la fabricación de los productos a través de los movimientos hacia arriba o hacia abajo a lo largo del eje vertical Y, considerando que el plano de trabajo se encuentra en un plano horizontal X.

- 40 La unidad de mando y control 100 incluye una interfaz de componentes tanto de hardware como de software destinada a gestionar todo el proceso de EBM, así como los pasos del método de la presente invención y las señales de los diversos sensores.

- 45 El software de interfaz asegura la integración y el funcionamiento de todas las partes componentes del aparato 1 por medio de la regulación y el ajuste inicial de una composición de instrucciones de máquina a la que de aquí en adelante también se hace referencia como "tema", entendiéndose por este término el conjunto o paquete de información que contiene los parámetros de gestión del haz de electrones 3 que regulan la energía de generación e impacto según las operaciones a ser realizadas.

La unidad electrónica 100 también gestiona los medios de control de vacío 8 que regulan el nivel de vacío en el interior de la cámara 5 mediante la introducción controlada también de pequeñas cantidades de gas inerte.

- 50 El método de la presente invención para regular la operación del aparato de EBM 1, con el fin de obtener productos procesados certificados, se describirá ahora en detalle.

En su forma más general, el método en cuestión incluye los siguientes pasos:

1) un procedimiento de calibración IQ: que verifica la correcta operación de todas las partes componentes del aparato necesarias para asegurar la plena funcionalidad del mismo;

2) un procedimiento de calificación operativa OQ: que verifica la eficiencia operativa del proceso de fusión en sí mismo con el fin de definir los límites de ajuste del aparato en sí mismo;

5 3) un procedimiento de calificación del rendimiento PQ: que verifica la estabilidad y repetibilidad del proceso dentro de una ventana de proceso predeterminada.

En la figura 2 se muestra un diagrama de bloques resumido de estos pasos, que ejemplifica la evolución de los pasos del proceso de EBM que permite obtener piezas de cualquier forma y geometría a partir de una preparación adecuada de un archivo .abf relativo a la composición o tema a ser desarrollado.

10 Veamos ahora con más detalle los aspectos peculiares de estos procedimientos.

Paso 1) Procedimiento de calibración IQ

Un proceso de EBM llevado a cabo dentro de un aparato de fusión de EBM usa diferentes archivos, parámetros de hardware y parámetros de software según el tipo de polvo metálico usado, por ejemplo Ti Gr.2 o Ti6Al4V. Con el fin de realizar los programas de producción llevados a cabo en los diferentes tipos de aparatos disponibles, se hace referencia a una serie de instrucciones operativas definidas junto con el fabricante del aparato.

15 En esencia, un procedimiento de calibración IQ se basa en la verificación de que los componentes de hardware y software del aparato 1 están presentes y funcionando, así como que se cumplen, si es necesario, todas las condiciones circundantes (por ejemplo, condiciones ambientales, de seguridad, verificación de cualquier unidad auxiliar, calibración, etc.).

20 Más en particular, con el procedimiento de calibración inicial, la funcionalidad de las partes componentes más importantes del aparato 1 se verifica por medio de sensores y/o instrumentos de medición presentes en el aparato en sí mismo. Además, la verificación de los parámetros del proceso de EBM tiene lugar según el criterio de análisis del peor de los casos, definiendo y evaluando las características del producto/proceso en el peor caso operativo identificado y para cada aparato suministrado y para cada material usado por el mismo.

25 Por ejemplo: con el fin de verificar la correcta funcionalidad de las partes componentes principales del aparato 1 y de los elementos móviles, se debe hacer la siguiente verificación:

- la condición de vacío de la cámara de trabajo 5 se puede detectar por medio de sensores de presión;

- la temperatura del plano de trabajo 6 y del entorno de proceso se puede detectar por medio de sensores de temperatura;

30 - la corriente aplicada al filamento del cañón electrónico 2 es fácilmente detectable por medio de un sensor de corriente;

- el movimiento de las partes componentes móviles, tales como el dispositivo distribuidor 11 y el desplazador 13 del plano de trabajo, se detecta por medio de sensores de posición.

35 La calibración de los sensores de vacío se comprueba por medio de instrumentos de referencia certificados adecuados; mientras que el movimiento del dispositivo distribuidor 11 y del desplazador 13 se regula de modo que la distribución de las capas de polvo sea uniforme y constante para cada una de las capas fabricadas.

En particular, las calibraciones se deberían realizar con el fin de verificar que los componentes de HW del proceso de EBM estén calibrados correctamente, y que en consecuencia los valores leídos en la interfaz de SW son verdaderos.

40 La verificación de la calibración del termopar se debe hacer con sondas de calibración apropiadas conectadas al cable del termopar colocado en contacto con la placa de inicio. La verificación de la calibración de los sensores de vacío se debe hacer conectando una sonda de calibración, por medio de conexiones adecuadas, a lo largo de la línea principal de las turbobombas conectadas al cañón y a la cámara de EBM y de la bomba de respaldo conectada a la cámara de EBM.

45 La verificación de la calibración de HV se debe hacer usando un voltímetro calibrado y conectando adecuadamente un adaptador a los terminales de los contactos apropiados. El modo de ejecución de la prueba y las lecturas hechas debe ser según lo que se expone en la especificación de referencia. La calibración del movimiento de la placa de inicio se debe verificar bajando la placa usando la interfaz de software y comprobando que el nivel de descenso corresponde al preestablecido.

50 Al hacerlo, se puede demostrar que la configuración real de la máquina corresponde a las condiciones de operación ideales expuestas por el fabricante del aparato 1.

También, el haz de electrones 3 está calibrado adecuadamente para estar enfocado en el plano de trabajo 6.

5 Las condiciones ideales se pueden identificar en una serie de parámetros o valores de referencia que son parte tanto de los activos del equipo sobre la base de las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante, como de información derivada de series históricas de procesos ya llevados a cabo que han permitido recoger datos y series estadísticas sobre la configuración del aparato y resultados relacionados de los procesos realizados.

10 Estos datos e información de referencia están contenidos en el banco de memoria 12 asociado con la unidad de mando y control 100. Opcionalmente, también se proporciona la revisión documental de la presencia de todos los componentes del aparato 1 especificados por el suministrador así como la documentación con relación a la verificación del correcto montaje de la máquina, para asegurar, al menos tras la primera instalación, que la funcionalidad de la máquina cumple con las especificaciones de venta.

En resumen, las pruebas mínimas a ser realizadas en el paso de calibración se muestran en la siguiente tabla:

Ref.	Prueba	Requisito	Cantidad
IQ.T1	Presencia de declaración de conformidad y formularios IQ/OQ	Presente y completa	NA
IQ.T2	Comprobación de las instalaciones de la máquina y sistemas de HW/SW	Presente y funcionando, informe de registro	NA
IQ.T3	Calibración de sensores de vacío, termopar, placa de inicio de eje Z, voltaje de suministro de filamento, corriente de filamento	Certificados de calibración, informe de calibración	NA
IQ.T4	Calibración de haz	Completada, presencia de informe de calibración y archivo	1
IQ.T5	Arranque de EBM, carga de archivos/temas, generación de vacío, suministro de filamento	Completada (pasos 1-7)	1

15 Con estas pruebas, ya es posible recoger un conjunto de datos y valores de algunos parámetros que afectan al correcto rendimiento del proceso de fusión posterior. Estos datos y valores, recuperados posiblemente en forma de rango de valores, se almacenan en el banco de memoria asociado con la unidad de mando y control electrónica 100.

Paso 2) Procedimiento de calificación operativa OQ

El procedimiento de calificación operativa tiene como objetivo encontrar una ventana de proceso dentro de la cual se considere óptima la fusión EBM. En otras palabras, tiene como objetivo la identificación de rangos de valores de los parámetros del proceso dentro de los cuales los productos de fusión se consideran que son de buena calidad.

20 Se cambian los parámetros del proceso de la composición o tema con contundencia para lograr los niveles máximos y mínimos de energía que permitan una correcta fusión de los polvos.

25 Para cada una de estas dos configuraciones extremas, o mejor, los extremos del rango de valores en los parámetros del proceso, se realizan muestras o especímenes correspondientes, que posteriormente se caracterizan y prueban para asegurar que en condiciones extremas de uso del sistema, los productos fabricados cumplirán con los requisitos mínimos establecidos. De aquí en adelante, el ejemplo A y el ejemplo B se refieren a los resultados relevantes del proceso de fusión en condiciones extremas de nivel mínimo (A = Baja Energía) y nivel máximo (B = Alta Energía) de la energía de fusión.

30 El proceso del ejemplo A se usa para comprobar los parámetros que tienen el mayor impacto en la calidad de los productos fabricados, mientras que el proceso del ejemplo B verifica los parámetros que tienen menos importancia, tales como los que regulan el paso del haz de electrones en áreas limitadas o que corrijan las imprecisiones de los mismos.

Los requisitos de aceptabilidad de cada prueba se establecen según las regulaciones internacionales, si las hay, o sobre la base de un listado histórico de datos y experiencia de actividades anteriores llevadas a cabo por el Solicitante, si las regulaciones son deficientes.

5 Aún a modo de ejemplo, las pruebas codificadas se realizan al principio identificando los parámetros con el mayor impacto, e identificando su contribución en el equilibrio de energía.

10 Las dos configuraciones de estos parámetros que identifican la energía mínima y máxima liberada durante el proceso de fusión se prueban en una secuencia. Además, los aspectos relacionados con las operaciones del aparato 1, tales como por ejemplo la calidad de los polvos, el rendimiento de la unidad de alto voltaje, la correcta calibración del haz de electrones, el movimiento del dispositivo desplazador y del plano de trabajo, se cubren mediante pruebas específicas e individuales.

Con el fin de aplicar el procedimiento de calificación operativa OQ según el método de la presente invención, fue necesario identificar los parámetros críticos y distinguirlos de aquellos que no son críticos, según algunos principios descritos de aquí en adelante.

15 En primer lugar, se debe considerar que el método de la presente invención supone que el aparato electromecánico 1 bajo consideración en este caso es un aparato de EBM, que lleva a cabo un proceso de fusión en base a una ley de equilibrio de calor.

De hecho, las condiciones de vacío y calentamiento del polvo requieren la observancia de un principio de equivalencia entre el calor liberado por el haz de electrones y el calor disipado a través del material.

20 Esto normalmente da como resultado la configuración de una potencia promedio del haz de electrones tal como para asegurar un equilibrio correcto de estas cantidades, expresadas en términos de corriente requerida para generar el haz de electrones y usada para las diversas operaciones de fusión, que se pueden distinguir en: calentamiento; fusión de partes sólidas, fusión de contornos y estructuras porosas, o también cualquier paso de calentamiento intermedio, siempre para asegurar el correcto equilibrio de calor.

25 La figura 3 muestra esquemáticamente un diagrama del principio de operación de equilibrio térmico compensado que se trata.

Más particularmente, este principio debe asegurar el equilibrio térmico para un volumen total de sólido hecho de cualquier forma y tamaño. Además, con el fin de identificar los parámetros críticos, cada parámetro del grupo de parámetros de calibración se ha evaluado por el impacto que tiene sobre el proceso y sobre los rasgos finales de los productos obtenidos por fusión.

30 Como está claro en la figura 3 anterior, el proceso procede con una alternancia de pasos de calentamiento y enfriamiento que afectan a partes predeterminadas de los productos que se van a fabricar. En cualquier caso, el equilibrio general es casi perfectamente equivalente.

35 Como ya se explicó anteriormente, el proceso de EBM basa su operación en la creación de un haz de electrones 3 para fusionar los polvos metálicos. Los electrones se enfocan y se mueven a través del uso de bobinas magnéticas 4 situadas en los lados del cañón 2 que transporta el haz de electrones en la cámara procesamiento de fusión o EBM 5.

40 Con el fin de lograr la geometría deseada de los productos, el haz 3 se debe mover adecuadamente y modular su energía para permitir una transferencia adecuada de energía al polvo, para fundirlo y mantener constante la temperatura de la capa derretida, para hacer componentes uniformes desde el punto de vista estructural (densidad) y de propiedades físico-químicas-mecánicas.

Este proceso se logra a través del uso de una aplicación de SW y componentes de HW, específicamente:

- movimiento del dispositivo 11 responsable de la recogida y distribución de la cantidad correcta de polvo, para obtener una capa uniforme a ser fundida. La medición de la cantidad de polvo distribuido se controla leyendo dos sensores colocados a los lados del plano de trabajo 6.
- 45 - corriente del filamento del cañón 2, que está vinculada a la energía de los electrones y que se regula según las operaciones realizadas por el haz 3 (que consiste, para cada proceso de fusión de las capas de polvo, en: calentamiento del polvo (a), y fusión de contornos (b), partes sólidas (c) y estructuras de red (d), en este orden).
- parámetros de gestión del haz de electrones, contenidos en el paquete de información denominado "Tema" dentro de la aplicación de software de control de EBM. El tema se divide por pasos del proceso (precalentamiento, contorno + fusión y red) y controla la energía que debe tener el haz de electrones con el fin de optimizar el proceso de fusión de los componentes fabricados, en términos de haz 3 y velocidad de paso actual.
- 50

Por tanto, los parámetros que pueden influir fuertemente en el proceso estarán relacionados con estos aspectos del haz de electrones 3.

Con el fin de optimizar aún más que el proceso de fusión permita la máxima flexibilidad al sistema en términos de geometrías alcanzables, se han proporcionado conjuntos de parámetros que mejoran el comportamiento del haz de electrones a nivel local, mejorando y refinando la velocidad de paso en ciertas áreas y para hacer geometrías particulares.

5 Estos parámetros afectan en menor medida al proceso, en términos de los rasgos finales del producto fabricado.

Por lo tanto, se decide dividir los parámetros del tema en críticos y no críticos, y para proporcionar la identificación de los intervalos de uso y pruebas para los primeros para comprobar la calidad del proceso en todo el intervalo identificado de este modo, y para los últimos una prueba de verificación de la optimización hecha al proceso.

10 Los rangos de parámetros críticos fueron determinados experimentalmente por la experiencia y el saber hacer (know-how) adquiridos a lo largo de los años por el Solicitante, en particular en la fabricación de componentes protésicos con tecnología de EBM.

15 Ventajosamente, según la invención, fue posible determinar que cada uno de los parámetros identificados como claves para el proceso afecta a la cantidad de energía entregada por el haz de electrones 3 y esto tiene un impacto directo sobre las características de los productos obtenidos por sinterización y sobre su uniformidad. De hecho, estudios detallados emprendidos durante el desarrollo del aparato y del método según la invención permitieron determinar que la energía del haz 3, en condiciones ambientales iguales (vacío y otras condiciones iniciales), es responsable del nivel de temperatura de la capa derretida.

Para cada composición de EBM o tema de fusión, se desarrollaron algunas ecuaciones que cuantifican la energía del haz de electrones usado, en base a los siguientes principios:

$$T \propto \frac{E}{A}$$

$$E \propto t \cdot I \cdot V$$

20

donde:

T es la temperatura de la capa derretida;

E es la energía aplicada al haz de electrones;

A es el área de fusión;

25 t es el tiempo de la fusión;

I es la corriente del filamento de correlación del haz de electrones; y

V el potencial a través del filamento.

30 Por ejemplo, dependiendo del tipo de tema a ser hecho, es decir, dependiendo del tipo de productos que necesitan ser fabricados, la unidad de control 100 del aparato 1 es susceptible de calcular, por medio de un procedimiento automatizado, el tipo de energía a impartir al haz de electrones para una correcta y eficaz producción de productos procesados certificados. Al hacerlo así, la unidad de control usa fórmulas de correlación entre el voltaje aplicado a los terminales del cañón de electrones 2, la corriente del filamento, la duración de la exposición al haz y la temperatura de la capa derretida.

Todavía a modo de ejemplo solamente, se usa la siguiente fórmula de correlación para el paso de precalentamiento

Tema	Ecuación
Precalentamiento	$E = V \cdot \text{corr} \cdot (l.\text{desplazamiento} \cdot (n.\text{rep} + l.\text{orden}))$ velocidad

35

Se usan otras fórmulas de correlación para los otros pasos de fusión reales del cuerpo de los productos o fusión de los contornos o curado de la retícula.

40 Se debería señalar que si se modifica un parámetro de la fórmula de correlación, también es apropiado modificar otros para su compensación. No obstante, de esta forma también es posible definir los límites extremos de la variación de los parámetros con la identificación de un rango de múltiples valores dentro del cual encuentran aplicación la mayoría de los procesos a ser realizados.

Por ejemplo, variando los parámetros anteriores entre los valores máximos y mínimos de un rango predeterminado, es posible obtener un nivel de energía de fusión mínimo (ejemplo A) y un nivel de energía de fusión máximo (ejemplo B) aplicados por el haz de electrones sobre la capa de polvo. Los rangos de uso de los parámetros críticos se dan en la siguiente tabla:

Tema de EBM	Parámetro crítico
Precalentamiento (I y II)	Corriente promedio
	Velocidad
	Desplazamiento de línea
	Orden de línea
	Nº de repeticiones
Fusión/eclosión	Función de velocidad
	Velocidad
	Corriente
	Desplazamiento de línea
	Desplazamiento de contornos
Fusión/contornos (Exterior e Interior)	Función de velocidad
	Desplazamiento
	Corriente
	Velocidad
	Nº de puntos
	Tiempo de punto
Red	Superposición
	Corriente
	Velocidad
	Superposición mínima
	Longitud de contorno mínima

5 En la práctica, el procedimiento consiste en preparar el aparato de EBM según las especificaciones y el procedimiento de calibración IQ. Los parámetros del tema a ser hechos se establecen con los valores mostrados en la configuración del "ejemplo A". En un segundo y posterior paso de procesamiento, los parámetros se establecen a los valores indicados en la configuración del "ejemplo B".

10 Los productos obtenidos como resultado de estas configuraciones se someten a una serie de pruebas de calidad para verificar que los resultados de los pasos de producción sean consistentes con los valores indicados por los estándares de referencia y registrados en las ubicaciones dedicadas del banco de memoria asociado con la unidad de control 100 del aparato. Este paso de control final se describirá con más detalle con referencia al tercer paso de calificación de rendimiento.

- 15 Estas pruebas de calidad son:
- Prueba acerca de la correspondencia dimensional L;
 - Pruebas de tracción en la dirección z;
 - Pruebas de tracción en las direcciones x e y;
 - Análisis químico completo;
- 20 - Evaluación de porosidad, discontinuidades o micrografía;
- Análisis visual, adhesivo y de compresión de la red estructural.

Las pruebas de calidad se llevan a cabo según especificaciones predeterminadas que también incluyen los métodos y esquemas de corte de las muestras resultantes, las alturas de los cortes hechos y todos los tamaños de bloques sometidos a tracción o compresión.

Los especímenes y muestras se distribuyen de tal forma en cuanto a proporcionar una indicación de todo el volumen de producción posible en el aparato de EBM bajo examen. La validez de los intervalos en los valores de parámetros se verifica realizando una prueba específica.

- 5 Para resumir lo que se expone en la presente memoria, se proporciona a continuación una tabla que enumera los parámetros críticos por tipo de tema usado (para las operaciones de calentamiento y fusión de partes sólidas, contornos y estructuras porosas, respectivamente). La tabla también muestra los efectos que resultan de una configuración incorrecta de estos parámetros. Como resultado de las pruebas llevadas a cabo, es posible definir los intervalos de validez de todos los parámetros.

Tema de EBM	Parámetro crítico	Influencia
Precalentamiento (I y II)	Corriente promedio	Equilibrio de temperaturas del proceso hacia arriba/hacia abajo
	Velocidad	Ajusta la velocidad del haz
	Desplazamiento de línea	Ajusta la distancia entre las líneas de paso del haz
	Orden de línea	Ajusta el tiempo de latencia entre el paso del haz entre dos líneas adyacentes
	Nº de repeticiones	Número de pasos de calentamiento, aumento/descenso del tiempo de precalentamiento
Fusión/eclosión	Función de velocidad	Ajusta el factor de corrección de la velocidad del haz en función de la corriente del haz durante la fusión (y el tamaño del grupo de fusión)
	Velocidad	Ajusta la velocidad del haz (y el tamaño del grupo de fusión)
	Corriente	Ajusta la corriente del haz (y el tamaño del grupo de fusión)
	Desplazamiento de línea	Ajusta la distancia entre las líneas de paso del haz
	Desplazamiento para contornos	Compensa el tamaño del grupo de fusión estableciendo un desplazamiento relativo a la trayectoria teórica del paso del haz
Fusión/contornos (Exterior e Interior)	Función de velocidad	Ajusta el factor de corrección de la velocidad del haz en función de la corriente del haz durante la fusión (y el tamaño del grupo de fusión)
	Desplazamiento	Compensa el tamaño del grupo de fusión estableciendo un desplazamiento relativo a la trayectoria teórica del paso del haz
	Corriente	Ajusta la corriente del haz (y el tamaño del grupo de fusión)
	Velocidad	Ajusta la velocidad del haz (y el tamaño del grupo de fusión)
	Nº de puntos	Ajusta la potencia del haz (y el tamaño del grupo de fusión)
	Tiempo de punto	Ajusta el tiempo de permanencia del haz en un punto (y el tamaño del grupo de fusión)
	Superposición	Ajusta la superposición del haz entre dos líneas contiguas
Red	Corriente	Ajusta la corriente del haz (y el tamaño del grupo de fusión)
	Velocidad	Ajusta la velocidad del haz (y el tamaño del grupo de fusión)
	Superposición mínima	Ajusta la superposición del haz entre dos líneas contiguas
	Longitud de contorno mínima	Ajusta el tiempo de permanencia del haz en un punto (y el tamaño del grupo de fusión)

10 Paso 3) Procedimiento de calificación de rendimiento PQ

El procedimiento de PQ final se basa en la verificación de la configuración de los parámetros del proceso y en la confirmación de la capacidad de los mismos, en base a criterios de aceptabilidad preestablecidos.

- 15 Por lo tanto, este procedimiento de PQ debería verificar que el proceso de EBM haya sido capaz de producir componentes fundidos que tengan rasgos que cumplan con las disposiciones de los criterios de aceptabilidad de una manera estable y repetible.

Para hacerlo así, se llevan a cabo controles de calidad sobre muestras de los productos obtenidos.

- 20 Tales controles pueden ser por muestreo o sobre los primeros lotes de producción, por ejemplo, los tres primeros lotes, o incluso sobre todos los lotes en el caso de producciones de series limitadas y de alta calidad. Por supuesto, la elección del tipo de muestreo depende de diversos factores que no caen dentro de los principios de la presente invención y por lo tanto se omitirá la descripción de los mismos para evitar entorpecer lo siguiente.

Dado que el proceso de EBM basa su operación principalmente en la creación de un haz de electrones para fundir los polvos metálicos, se establece evaluar las características finales de los polvos fundidos con el fin de verificar la estabilidad de producción del proceso para un número de procesos igual a al menos tres, lo que representa un mínimo de garantía de repetibilidad de las operaciones de fusión.

5 Los parámetros críticos regulan las características del haz de electrones y determinan la cantidad de energía E liberada sobre la capa de polvo (y, en consecuencia, la corriente de generación y la velocidad del haz de electrones requeridas). También hay parámetros que no son críticos que refinan el paso del haz de electrones para permitir la realización de diferentes geometrías, incluso dentro de un mismo paso de procesamiento.

10 Actuando sobre las funciones que modulan el haz de electrones según la longitud de las líneas a ser fundidas, la distancia desde el contorno de la pieza y la presencia o no de una capa fundida en las capas subyacentes, todos factores leídos directamente del archivo .abf cargado al principio del paso de procesamiento (véase la Figura 2), los parámetros que no son críticos se usan para mantener la misma eficiencia del haz de electrones en cualquier área del volumen de construcción y para cualquier geometría realizada.

15 Además, dado que se ha verificado la operación del sistema de EBM por medio del procedimiento de OQ dentro de una ventana de proceso bien determinada, las pruebas proporcionadas por el procedimiento de PQ se llevan a cabo sobre material producido usando parámetros del proceso que caen dentro del campo de uso anterior del aparato y verificables monitorizando los mismos.

20 De nuevo a modo de ilustración, se desarrollaron siete pruebas para ser ejecutadas para los tres primeros procesos de producción consecutivos (independientemente del tamaño pero pertenecientes a los productos que se pueden fabricar).

PQ.T1	Micrografía
PQ.T2	Porosidad/discontinuidad
PQ.T3	Tracción completa
PQ.T4	Análisis de oxígeno y nitrógeno
PQ.T5	Inspección dimensional (X Y y Z)
PQ.T6	Inspección visual
PQ.T7	Comprobación de informe de estudio de registro

Pues bien, según el método de la presente invención, si los resultados de las pruebas o de las diversas pruebas están dentro de los límites, el proceso se considera bajo control y los productos relacionados se consideran que cumplen con las especificaciones y por ello se certifican.

25 De otro modo, se activa una acción correctiva con el fin llevar de vuelta el proceso a las condiciones de operación ideales, compensando todas las derivas.

30 Ventajosamente, la intervención de regulación sobre la energía de generación E del haz 3 del aparato de EBM permite remediar rápidamente más de una deriva que aqueja a más de un parámetro. Operativamente, la regulación de dicha energía de generación del haz de electrones 3 se lleva a cabo regulando la corriente aplicada al filamento de un cañón de generación electrónico 2 del haz en sí mismo.

En esencia, la regulación de la energía de generación E del haz es una corrección aplicada a un único parámetro frente a la desviación de uno o más parámetros del proceso.

35 Cualquier corrección o compensación correctiva de las derivas del proceso se lleva a cabo cambiando un único parámetro relacionado que, en este caso, está representado por la energía de aplicación del haz de electrones del aparato de EBM.

Se pueden tomar otras acciones opcionales, tales como:

- nuevas pruebas de laboratorio para confirmar el paso real de los límites de aceptabilidad;
- verificación de algunas partes de hardware del aparato;
- verificación de la calibración de los parámetros del proceso críticos;
- 40 - verificación de la correcta aplicación de los procedimientos/instrucciones de ejecución/control del proceso (por ejemplo: ejecución del proceso, control del proceso y formación del personal);
- aumentar la frecuencia de monitorización de los parámetros del proceso críticos para determinar la estabilidad de los mismos a lo largo del tiempo.

REIVINDICACIONES

1. Método para regular la operación de un aparato de EBM (1) para obtener productos procesados certificados, el método que comprende:

5 un paso de calibración inicial para comprobar el funcionamiento correcto de todas las partes componentes del aparato de EBM (1) y estructurado para asegurar una completa funcionalidad del mismo;

y un paso de control de calidad posterior llevado a cabo sobre los productos obtenidos que se obtienen por el proceso de trabajo llevado a cabo;

el método que comprende:

- definir una pluralidad de parámetros de medición con relación a las partes componentes del aparato de EBM (1);

10 - medir dichos parámetros de medición por medio de sensores y/o indicadores de medición acoplados a una unidad de control de aparato (100) y relacionados con dichos parámetros de medición durante al menos una fase de procesamiento realizado por dicho aparato de EBM (1);

15 - realizar un paso de control de calidad de los productos obtenidos después del proceso de trabajo, y obtener datos de calidad relacionados con cualquier desviación de la calidad esperada, en donde dicho paso de control de calidad proporciona una serie predefinida de controles dimensionales, químico-físicos y de resistencia, y en donde dicho paso de control de calidad proporciona al menos las siguientes pruebas sobre muestras de los productos obtenidos:

- Prueba acerca de la correspondencia dimensional L;

- Pruebas de tracción en la dirección z;

- Pruebas de tracción en las direcciones x e y;

20 - Análisis químico completo;

- Evaluación de porosidad, discontinuidades o micrografía;

- Análisis visual, adhesivo y de compresión de la red estructural;

- comparar dichos parámetros medidos y datos de calidad con los valores correspondientes de parámetros de referencia disponibles para ese aparato de EBM (1) específico y para el tipo de productos obtenidos;

25 - detectar cualquier desviación en uno o más de dichos parámetros medidos o dichos datos de calidad con respecto a los valores de los parámetros de referencia;

- calcular, sobre la base de tales desviaciones, un valor de corrección y regulación total de una energía de generación de un haz de electrones (3) de dicho aparato de EBM (1);

30 - aplicar dicho valor de corrección y regulación total a la energía de generación de un haz de electrones (3) de dicho aparato de EBM (1);

la energía de generación del haz de electrones (3) que se obtiene a partir de fórmulas de correlación entre los parámetros asociados a las partes componentes del aparato de EBM (1) en base a las siguientes relaciones:

$$T \propto \frac{E}{A}$$

$$E \propto t \cdot I \cdot V$$

en donde:

35 T es la temperatura de la capa derretida;

E es la energía aplicada al haz de electrones;

A es el área de fusión;

t es el tiempo de la fusión;

I es la corriente del filamento de generación del haz de electrones; y

V el potencial a través del filamento;

en donde la unidad de control (100) del aparato (1) calcula el valor de corrección y regulación total sobre la base de dichas fórmulas de correlación, y aplica automáticamente el valor de corrección y regulación total a la energía de generación del haz de electrones (3) para realizar productos procesados correspondientes a un nivel de calidad predeterminado;

5 en donde el paso de definir la pluralidad de parámetros de medición con relación a las partes componentes del aparato de EBM (1) se modifica durante el progreso de la vida útil del aparato de EBM (1) y también después de la aplicación de dicho valor de corrección y regulación total;

10 y en donde la regulación de dicha energía de generación del haz de electrones (3) se proporciona mediante el ajuste de un potencial eléctrico y/o corriente aplicados a un sistema de generación de dicho haz de electrones (3).

2. Método según la reivindicación 1, caracterizado por que una deriva de solo un parámetro con relación a una parte estructural mecánica del aparato de EBM (1) proporciona una corrección y ajuste de esa una única parte estructural mecánica.

15 3. Método según la reivindicación 1, caracterizado por que la fase de medición de dichos parámetros se realiza por medio de sensores y/o indicadores de medición montados en el mismo aparato de EBM (1).

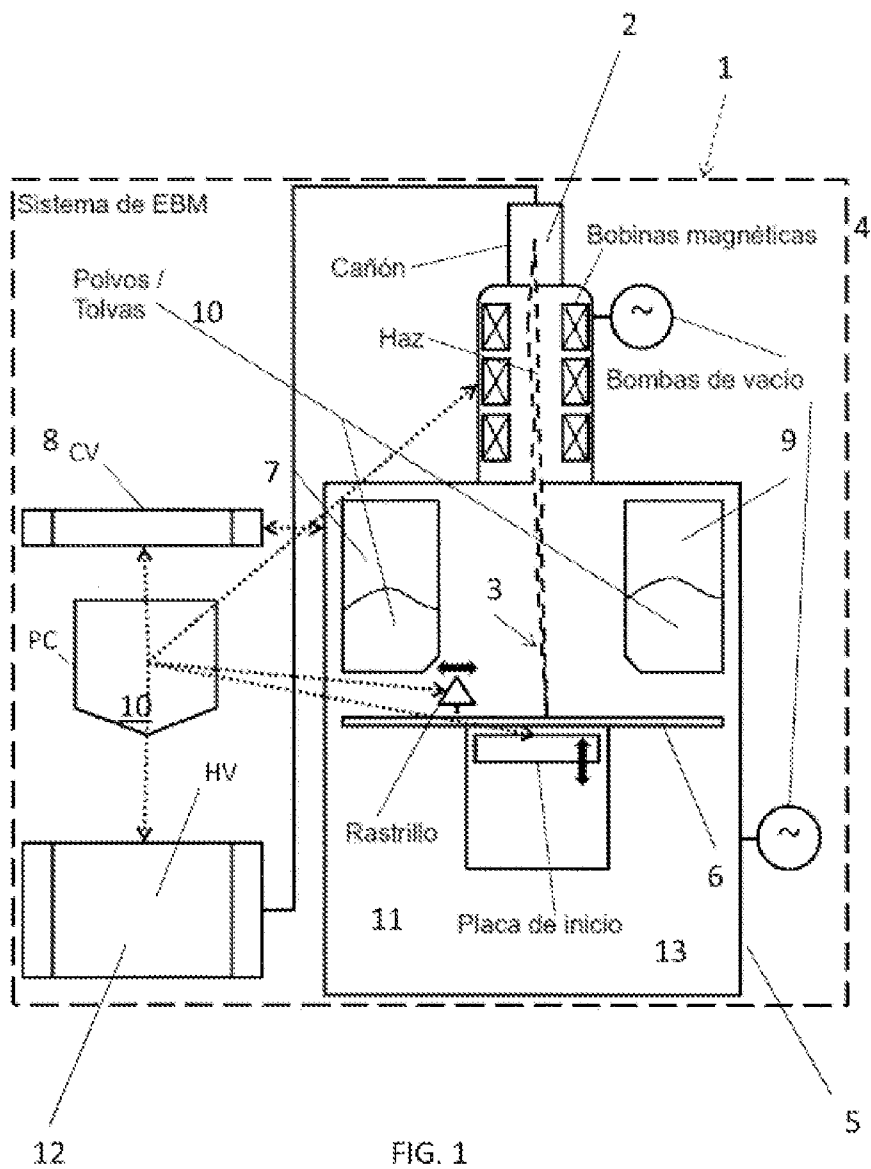
4. Método según la reivindicación 1, caracterizado por que las mediciones de dichos parámetros y los valores de los parámetros de referencia se almacenan en una parte de memoria asociada a la unidad de control de aparato (100).

5. Método según la reivindicación 1, caracterizado por que el paso de calibración inicial establece parámetros de operación en un intervalo predeterminado entre una serie de valores máximos y mínimos.

20 6. Método según la reivindicación 1, caracterizado por que dicho paso de control de calidad sobre los productos obtenidos se regula muestreando a un ritmo fijo o sobre los primeros lotes de producción de dichos productos obtenidos.

7. Aparato de EBM (1) estructurado para obtener productos procesados certificados implementando un método para regular la operación según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6.

25 8. Aparato de EBM según la reivindicación 7, que comprende un sistema para generar un haz de electrones (3).



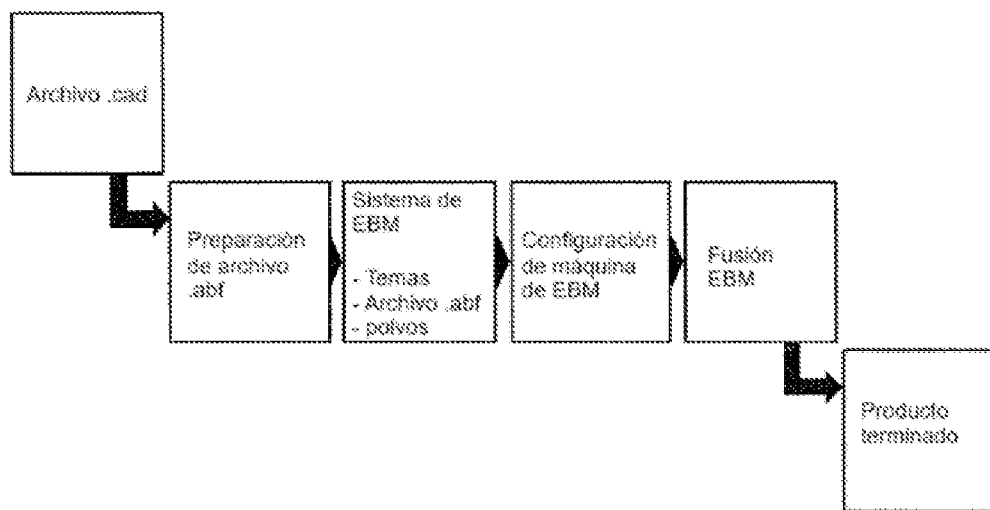


FIG. 2

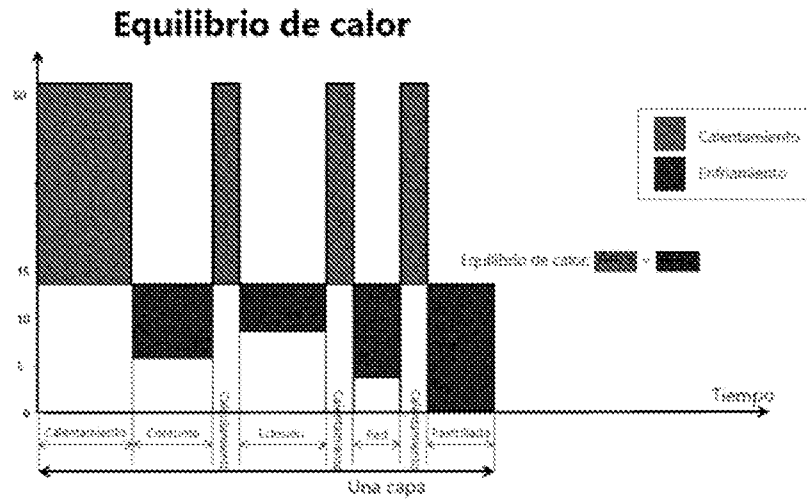


FIG. 3