

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 765 399**

51 Int. Cl.:

<b>H01F 1/153</b>	(2006.01)
<b>H01F 41/02</b>	(2006.01)
<b>B22F 3/105</b>	(2006.01)
<b>C22C 38/00</b>	(2006.01)
<b>C22C 38/02</b>	(2006.01)
<b>C22C 38/12</b>	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **10.12.2014 PCT/EP2014/077278**

87 Fecha y número de publicación internacional: **18.06.2015 WO15086705**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.12.2014 E 14815632 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.10.2019 EP 3080820**

54 Título: **Materiales magnéticos y procedimientos para su fabricación**

30 Prioridad:  
**12.12.2013 GB 201322010**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**09.06.2020**

73 Titular/es:  
**EXMET AB (100.0%)  
Norrängsvägen 69B  
141 43 Huddinge, SE**

72 Inventor/es:  
**UNOSSON, MATTIAS;  
HJÖRVARSSON, BJÖRGVIN;  
KAPAKLIS, VASSILIOS y  
MAGNUS, FRIDRIK**

74 Agente/Representante:  
**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

ES 2 765 399 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**

Materiales magnéticos y procedimientos para su fabricación

**5 Campo de la invención**

La presente invención está dirigida a novedosos materiales magnéticos y a procedimientos para la fabricación de dichos materiales magnéticos.

**10 Antecedentes de la invención**

Las técnicas de fusión selectiva, localizada por láser y fusión por haz de electrones de materiales en polvo se han descrito previamente en relación con la fabricación de cuerpos tridimensionales de metal amorfo, metal cristalino y metal nanocristalino.

15

Cuando se enfría un material metálico desde la fase fundida a la sólida, generalmente se obtiene una estructura policristalina. La microestructura consiste en una gran cantidad de granos diferentes donde los átomos en cada grano están dispuestos de acuerdo con un patrón regular. Si los átomos están completamente desordenados y no hay granos con átomos posicionados regularmente, se dice que el material es amorfo. Esto puede lograrse, por ejemplo, enfriando una masa fundida muy rápidamente para que no haya tiempo para que crezca ningún grano.

20

El documento de patente US 8052923 describe una técnica en la que se construye un cuerpo tridimensional capa por capa. Se aplica una capa de polvo metálico a una base conductora de calor y se funde un área limitada de la capa usando una pistola de radiación, como un láser o un haz de electrones. El área se enfría para que el área fundida se solidifique en un metal amorfo. El procedimiento de fusión y el procedimiento de enfriamiento pueden repetirse sucesivamente en nuevas áreas limitadas de la capa hasta que se forma una capa continua de metal amorfo. Luego se puede aplicar una nueva capa de polvo y repetir los procedimientos de fusión y enfriamiento, siendo fusionada la nueva capa con el metal amorfo subyacente. Con capas sucesivas, se puede formar un cuerpo tridimensional de metal amorfo.

25

30

Debido a que pequeñas áreas de las capas de polvo se funden a la vez con la pistola de radiación, las áreas fundidas se pueden enfriar inmediatamente. Un pequeño volumen de aleación fundida es fácil de enfriar y se puede lograr la velocidad crítica de enfriamiento para que el volumen fundido se solidifique en metal amorfo.

35

El documento de patente US 8333922 describe un desarrollo adicional de la técnica descrita en el documento de patente US 8052923. En el documento de patente US 8333922 se reconoce que las áreas fundidas pueden enfriarse de acuerdo con una curva de tiempo-temperatura estipulada para formar un compuesto de partículas de metal cristalino o nanocristalino en una matriz de metal amorfo. El procedimiento puede repetirse hasta que se forme una capa continua que contenga metal compuesto en la medida deseada. En consecuencia, se pueden aplicar nuevas capas de polvo y repetir el procedimiento para la construcción de un cuerpo tridimensional que tenga la estructura cristalina o nanocristalina necesaria.

40

El documento de patente US 8333922 también divulga que las dos técnicas pueden combinarse, en las que un área limitada de metal amorfo ya formado se recalienta por medio de la pistola de radiación a una temperatura por encima de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) del material y la pistola de radiación está regulada de tal manera que el área limitada es tratada térmicamente de acuerdo con una curva de tiempo-temperatura estipulada para transformar el metal amorfo en un compuesto de partículas de metal cristalino o nanocristalino en una matriz de metal amorfo. Se pueden establecer curvas de tiempo-temperatura adecuadas mediante diagramas TTT (Transformación de Temperatura Temporal) y diagramas de CCT (Transformación de Enfriamiento Continuo). Los diagramas comprenden una curva de cristalización, denominada nariz, que muestra la temperatura y el momento en que comienza la cristalización en la aleación amorfa en el estado superenfriado.

45

50

El documento de patente JP 2012 019030 describe un aparato para fabricar un imán sinterizado laminado en el que se coloca una capa de polvo magnético en un molde, se aplica un campo magnético a las partículas magnéticas en el molde y se usa una unidad de irradiación láser para sinterizar el imán. Entonces se puede bajar un pedestal y agregar más polvo magnético para procesar una capa posterior. El documento de patente US 5545367 describe un aparato para estereolitografía 3D de alta presión que incluye medios para la imposición de campos magnéticos para alinear partículas magnéticas dispersas en un fluido precursor polimérico. Durante la irradiación con láser, la resina se endurece y se fija la alineación magnética de las partículas.

55

60

En la presente invención, se ha reconocido que estas técnicas de fabricación descritas en los documentos de patente US 8052923 y US 8333922 pueden explotarse y desarrollarse para impartir propiedades específicas y localizadas en los materiales metálicos fabricados y para crear materiales metálicos novedosos.

65

Un objeto de la presente invención es proporcionar un material que tenga ciertas características, por ejemplo,

anisotropía magnética, que se localiza en áreas específicas del material.

### Sumario

5 La invención proporciona un procedimiento para controlar la anisotropía magnética en un material magnético de acuerdo con la reivindicación 1 y un aparato para producir un material magnético con anisotropía magnética controlada de acuerdo con la reivindicación 14. La presente divulgación generalmente describe una estructura magnética que comprende una pluralidad de capas, capas seleccionadas de la estructura que tienen una composición química diferente y una anisotropía magnética diferente.

10 La estructura magnética se puede formar como una estructura unitaria de material cristalino, nanocristalino o amorfo, o una combinación de regiones de material cristalino, nanocristalino y amorfo en la estructura unitaria. La estructura magnética se puede formar mediante un procedimiento de fusión en polvo. Al menos una capa dentro de la estructura puede exhibir un cambio gradual en la anisotropía magnética a lo largo de una dirección dentro del plano. El cambio de etapa en la anisotropía magnética puede ser un cambio de etapa en la coercitividad o un cambio de etapa en la dirección del eje fácil, o ambos. Al menos una capa dentro de la estructura puede exhibir una periodicidad en la anisotropía magnética a lo largo de una dirección dentro del plano. La estructura magnética puede exhibir una periodicidad en la anisotropía magnética a lo largo de una dirección transversal a los planos de las capas. Al menos una capa de la estructura puede comprender una capa de metal amorfo. Al menos una capa de la estructura puede comprender una capa de metal nanocristalino o una capa cristalina.

La presente divulgación describe un procedimiento para controlar la anisotropía magnética en un material magnético que comprende etapas de:

25 i) dirigir una capa de material metálico en polvo a un sustrato conductor de calor;  
 ii) aplicar suficiente energía electromagnética al material en polvo para fundir el material en polvo;  
 iii) posteriormente enfriar el material fundido para crear una capa sólida sobre el sustrato,  
 iv) aplicar un campo magnético externo al material durante al menos la etapa iii) para imprimir la capa de material magnético sólido con anisotropía magnética.

30 El procedimiento puede además comprender una etapa de aplicar la energía electromagnética solamente a elementos de volumen seleccionados de la capa durante la etapa ii) para crear de ese modo una variación espacial de la anisotropía magnética impresa dentro de la capa. Las etapas ii), iii) y iv) pueden repetirse en diferentes elementos de volumen seleccionados de la capa para crear de ese modo una variación espacial de la anisotropía magnética impresa dentro de la capa. Las etapas ii), iii) y iv) pueden repetirse usando diferente dirección y/o magnitud del campo magnético externo. El campo magnético externo aplicado puede variarse durante al menos la etapa iii) controlando de ese modo la anisotropía magnética impresa dentro de la capa para crear una variación espacial de la anisotropía magnética impresa. El campo magnético externo aplicado puede variarse girando el campo magnético. Las etapas i) a iv) pueden repetirse para formar capas sucesivas de material magnético, cada una impresa con anisotropía magnética. El procedimiento puede incluir además variar la composición de material metálico en polvo para las capas sucesivas. Esto puede incluir variar la dirección y/o la magnitud del campo magnético externo aplicado para las capas sucesivas. La etapa i) puede comprender disponer la capa de material metálico en polvo sobre el sustrato, y la etapa ii) puede llevarse a cabo cuando el material metálico alimentado está dispuesto sobre el sustrato. Las etapas i) y ii) pueden llevarse a cabo de manera sustancialmente simultánea distribuyendo el material metálico en polvo desde una boquilla mientras se aplica energía electromagnética para fundir dicho material dentro o adyacente a la boquilla. El campo magnético externo puede variar en uno o más espacios y tiempos durante la etapa iv) o para ocurrencias sucesivas de la etapa iv). El procedimiento puede ser o puede incorporarse dentro de un procedimiento de fabricación aditiva.

50 La presente divulgación también describe un aparato para producir un material magnético con anisotropía magnética controlada que comprende:

un dispensador de polvo configurado para dirigir una capa de material metálico en polvo sobre o hacia un sustrato conductor de calor;  
 55 una fuente de radiación configurada para dirigir la energía electromagnética al material en polvo sobre o cerca del sustrato conductor de calor, suficiente para fundir el material en polvo;  
 un mecanismo de enfriamiento para enfriar el material fundido en el sustrato conductor de calor;  
 un aparato generador de campo magnético configurado para aplicar un campo magnético al material fundido sobre el sustrato conductor de calor para imprimir una capa sólida de material magnético resultante del material fundido enfriado con anisotropía magnética.

Las realizaciones de la presente invención se describirán ahora a modo de ejemplo y con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

65 La Figura 1 es un diagrama esquemático en sección transversal de un aparato adecuado para producir un

cuerpo que tiene anisotropía magnética espacialmente variada a lo largo del cuerpo;

La Figura 2 es un diagrama esquemático en sección transversal de un aparato adecuado para añadir material a una anisotropía magnética espacialmente variada a un cuerpo;

5 La Figura 3 es una vista esquemática de un aparato experimental y estructura magnética construida con el mismo, la Figura 3a muestra una vista en planta y la Figura 3b muestra una sección transversal en la línea A-A; y

La Figura 4 muestra medidas de la anisotropía magnética de la muestra de estructura magnética producida con la disposición de acuerdo con la Figura 3.

10 A lo largo de la memoria descriptiva, la expresión "material" está destinada a abarcar composiciones, metales y aleaciones metálicas. La expresión "material magnético" puede abarcar metales, aleaciones metálicas y composiciones que incluyen tales metales y aleaciones metálicas, por ejemplo, silicio, oxígeno, nitrógeno u otros materiales para el control de resistividad eléctrica o para el control de otros parámetros y propiedades.

15 La Figura 1 ilustra un aparato adecuado para fabricar un material magnético en el que la anisotropía magnética del material se puede variar en función de la posición dentro del material. El aparato comprende una mesa de trabajo 1 (por ejemplo, un pedestal o plataforma), que es ajustable verticalmente (es decir, ajustable en la dirección z) y dispuesta en o sobre un soporte estructural, como una caja o un armazón 2. El ajuste vertical (es decir, el desplazamiento en z) de la mesa de trabajo 1 se puede realizar mediante cualquier mecanismo adecuado; en el  
20 ejemplo ilustrado se muestra un eje roscado 8 que gira dentro de una tuerca fija 9. Un dispensador de polvo 3 se puede mover en ambas direcciones x y y a través de la mesa de trabajo 1 para aplicar las capas de polvo 4. Una fuente de radiación 5, tal como un láser 5a o una pistola de haz de electrones 5b, tiene medios de control asociados 6 para dirigir el haz de láser o haz de electrones a posiciones seleccionadas en la capa de polvo 4. Se pueden utilizar otras fuentes de radiación que proporcionan energía electromagnética. Se puede utilizar más de una fuente  
25 de radiación. Cuando se usa más de una fuente de radiación, podrían ser del mismo tipo o de tipos diferentes, configurados para proporcionar haces múltiples que podrían dirigirse simultáneamente a las mismas o diferentes posiciones seleccionadas en la capa de polvo.

30 La mesa de trabajo 1 puede comprender una placa gruesa de material con alta conductividad térmica, por ejemplo, cobre. Los conductos o tuberías de enfriamiento 10 pueden estar dispuestos en la mesa de trabajo 1 para que un refrigerante pueda pasar a través de ella, enfriando la mesa de trabajo y cualquier pieza de trabajo sobre ella. Las conexiones 11 están dispuestas para el suministro y descarga del refrigerante. El refrigerante puede ser, por ejemplo, agua u otro medio fluido que transporte calor, tal como helio de alta pureza o gas hidrógeno, o puede ser un refrigerante.

35 El dispensador de polvo 3 puede ser un recipiente en forma de embudo que se puede deslizar sobre guías 12 paralelas a la mesa de trabajo, por ejemplo, en un plano x-y. El polvo se dispensa desde el borde inferior del dispensador 3 mientras pasa sobre la mesa de trabajo, y se puede desplegar un raspador u otro dispositivo nivelador (no mostrado) para distribuir uniformemente el polvo sobre la mesa de trabajo si es necesario.

40 La fuente de radiación 5 puede comprender un láser de alta potencia 5a, por ejemplo, un láser YAG, y los medios de control 6 pueden comprender espejos para desviar el haz láser para proporcionar movimiento del haz a través del plano x-y. La fuente de radiación 5 puede comprender un haz de electrones 5b, en cuyo caso los medios de control 6 pueden usar bobinas deflectoras.

45 El aparato puede comprender una carcasa 7 que puede ser un contenedor hermético para que se pueda mantener una atmósfera inerte, o un vacío o un vacío parcial en el caso de fusión por haz de electrones, durante el procedimiento de fusión. La carcasa 7 puede usarse para encerrar las partes del aparato que están sujetas al vacío cuando la fusión se realiza por haz de electrones, o puede encerrar las partes del aparato que están sujetas a una  
50 atmósfera de gas reactivo o inerte, por ejemplo, oxígeno y/o argón, cuando se usa fusión por láser.

Una ordenador de control 20 puede incluir un procedimiento de control de pedestal 22 configurado para controlar la posición z de la mesa de trabajo 1, un procedimiento de control de polvo 25 configurado para controlar el dispensador de polvo 3, un procedimiento de control de fuente de radiación configurado para controlar la fuente de  
55 radiación 5 y medios de control de posición x-y 6. El ordenador de control 20 incluye un procedimiento de control de enfriamiento 23 configurado para controlar el enfriamiento de la pieza de trabajo, por ejemplo, ajustando el caudal de refrigerante con una válvula 23a, o ajustando un ciclo de refrigeración. El procedimiento de control de enfriamiento 23 está configurado para proporcionar perfiles de velocidad de enfriamiento específicos y variables de acuerdo con la cristalinidad objetivo deseada y/o la estructura amorfa de la pieza de trabajo.

60 Una memoria 28 acoplada al ordenador de control 20 puede incluir archivos de datos que proporcionan todas las instrucciones de control de procedimiento requeridas para fabricar una estructura específica en la mesa de trabajo, como se describirá con más detalle más adelante.

65 Aunque en la Figura 1 se muestra que el aparato tiene una mesa de trabajo que está fijada en la posición x-y y es variable en la posición z, y la fuente de radiación 5 y el dispensador de polvo 3 están fijados en la posición z y se

pueden mover o dirigir en las posiciones x-y, más generalmente, cualquier mecanismo capaz de variar la posición de la mesa de trabajo 1 (y cualquier pieza de trabajo sobre la misma) en relación con la fuente de radiación y el dispensador de polvo puede ser adecuado.

5 En la Figura 1 también se muestra un aparato generador de campo magnético 21 dispuesto alrededor de la mesa de trabajo 1. El campo magnético generado de este modo se utiliza para imprimir anisotropía magnética en la pieza de trabajo. El aparato generador de campo magnético 21 puede ser cualquier aparato adecuado para generar un campo magnético que pase a través de las capas de polvo 4 a medida que se derriten y, particularmente, a medida que se enfrían. El generador de campo magnético 21 podría ser un generador de campo fijo, por ejemplo, uno o más imanes permanentes dispuestos alrededor o adyacentes a la mesa de trabajo 1. El generador de campo magnético 21 podría ser un generador de campo magnético variable, por ejemplo, cualquier disposición adecuada de imanes permanentes o electroimanes dispuestos alrededor o adyacentes a la mesa de trabajo mediante los cuales la dirección del campo y/o la intensidad del campo que pasa a través de las capas de polvo 4 puede variarse de forma controlable. Por ejemplo, utilizando electroimanes, la intensidad y/o dirección del campo puede controlarse usando corriente eléctrica. Una disposición podría incluir uno o más pares de bobinas Helmholtz dispuestas alrededor del borde de la mesa de trabajo, que podrían accionarse por separado para cambiar la dirección y la fuerza de campo. En otra disposición, los imanes permanentes cuya posición y/u orientación en relación con la mesa de trabajo pueden controlarse pueden usarse para variar la intensidad y/o dirección del campo magnético. La posición y/u orientación de los imanes permanentes podría controlarse utilizando un sistema de accionamiento mecánico controlado por ordenador o un sistema robótico. El uso de imanes de cuadrupolo laminado permite una rápida rotación del campo magnético, lo que permite la variación espacial de la anisotropía magnética impresa.

25 El generador de campo magnético puede controlarse mediante un procedimiento de control de campo magnético 24 en el ordenador de control 20.

Ahora se describirá un procedimiento de uso del aparato en el contexto de una fuente de radiación láser 5a, pero como se explicó anteriormente, una fuente de radiación de haz de electrones 5b podría usarse correspondientemente, o cualquier otra fuente de radiación electromagnética.

30 Una capa delgada de polvo 4 se extiende sobre la mesa de trabajo 1 por medio del dispensador de polvo 3. La capa de polvo puede nivelarse o dispersarse de otro modo mediante un raspador (no mostrado). El ordenador de control 20 dirige, por medio del procedimiento de control de fuente de radiación 26 y los medios de control 6, el láser a una o más áreas seleccionadas 30 de la capa de polvo 4 que se va a fundir. Se usan uno o más pulsos láser para fundir una o más áreas seleccionadas 30. Todo el grosor de la capa de polvo se funde en el área seleccionada para fusionarse con la mesa de trabajo 1. La transferencia de calor a la mesa de trabajo enfriada será, por lo tanto, óptima.

40 La potencia del haz y/o el tiempo de permanencia del haz en las áreas seleccionadas 30 se puede regular para lograr la velocidad de enfriamiento deseada y, por lo tanto, una curva deseada de tiempo-temperatura. Se podría barrer un haz continuo en las direcciones x y/o y para provocar la fusión continua de un camino a través de la capa de polvo 4, determinando la velocidad del haz el tiempo de permanencia. La velocidad de enfriamiento es controlada adicionalmente por el procedimiento de control de enfriamiento 23.

45 El ordenador de control 20 puede dirigir el láser 5a hacia áreas 30 sucesivas seleccionadas y el procedimiento de fusión repetido en esas áreas seleccionadas sucesivamente. La fuente de radiación 5 puede regularse a diferentes valores de potencia y/o tiempo de permanencia para cada área seleccionada si se requieren diferentes propiedades del material en cada área seleccionada. Este procedimiento puede repetirse hasta que todas las áreas seleccionadas requeridas se hayan fusionado en una capa continua. Las áreas seleccionadas direccionables más pequeñas pueden considerarse convenientemente como el tamaño mínimo de elementos de volumen (vóxeles) de material en polvo direccionable por el haz de radiación, y toda la capa de polvo 4 puede procesarse de acuerdo con un mapa de elementos de volumen a procesar, almacenados en la memoria 28.

55 En un procedimiento alternativo, se puede producir una capa completamente amorfa usando una velocidad de enfriamiento que proporciona una fase amorfa de material. La fuente de radiación puede entonces dirigirse sobre la capa amorfa y áreas seleccionadas o elementos de volumen calentados a una temperatura superior a la temperatura de transición vítrea  $T_g$  de la aleación. La potencia y el tiempo de permanencia del haz pueden regularse de modo que el elemento de volumen sea tratado térmicamente de acuerdo con una curva de tiempo-temperatura seleccionada para transformar el material amorfo en un compuesto de partículas metálicas cristalinas o nanocristalinas en una matriz amorfa. El procedimiento se repite en todas las áreas de la capa donde se va a transformar la estructura amorfa y se le da a la capa las propiedades de material deseadas en las partes seleccionadas.

65 Posteriormente, la mesa de trabajo 1 se baja y el dispensador de polvo 3 aplica una nueva capa fina de polvo 4. Las nuevas áreas seleccionadas o elementos de volumen se funden con la fuente de radiación 5, por lo que el

elemento de volumen se fusiona con la capa subyacente. De esta manera, el cuerpo tridimensional se construye capa por capa, cada capa tiene elementos de volumen que se funden de acuerdo con el perfil de sección transversal requerido del cuerpo tridimensional. Si el cuerpo está fusionado con la mesa de trabajo, el cuerpo puede soltarse cuando se complete. Las primeras capas producidas pueden ser material en exceso de sacrificio y pueden formarse para garantizar una buena transferencia de calor a la mesa de trabajo.

Una característica importante es que la intensidad y/o dirección del campo magnético que pasa a través de la pieza de trabajo por medio del generador de campo magnético se puede variar durante las etapas de calentamiento y enfriamiento. La presencia de este campo magnético, particularmente durante el procedimiento de enfriamiento, permite la impresión de anisotropía magnética específica en la capa que se procesa. Más específicamente, la presencia del campo magnético durante el enfriamiento permite la impresión de anisotropía magnética específica en cada elemento de volumen que se procesa. Por lo tanto, se reconocerá que, al variar la intensidad del campo magnético y/o la dirección del campo magnético proporcionada por el generador de campo 21, para cada elemento de volumen procesado por la fuente de radiación 5, se puede imprimir un patrón complejo de anisotropías magnéticas en el cuerpo de material magnético construido por los procedimientos descritos anteriormente.

Por lo tanto, en un aspecto general, se puede ver que el aparato proporciona un procedimiento para controlar la anisotropía magnética en un material magnético. Permite la creación de una variación espacial de la anisotropía magnética impresa dentro de una capa de material (es decir, la variación espacial de la anisotropía magnética en x y y) y también la creación de una variación espacial de la anisotropía magnética impresa de capa a capa (es decir, la variación espacial de anisotropía magnética en z).

El dispensador de polvo 3 ejemplifica un mecanismo para dirigir una capa de material metálico en polvo sobre un sustrato conductor de calor. El sustrato conductor de calor puede ser la mesa de trabajo 1, junto con cualquier capa procesada previamente de la pieza de trabajo subyacente al nuevo metal en polvo. La fuente de radiación 5 ejemplifica un medio para aplicar localmente energía electromagnética al material en polvo suficiente para fundir un elemento volumétrico del material en polvo, de modo que el elemento volumétrico pueda enfriarse posteriormente para crear una capa sólida. El generador de campo magnético 21 ejemplifica un medio para aplicar un material magnético externo al elemento volumétrico de material al menos durante su fase de enfriamiento y solidificación de modo que se pueda imprimir una anisotropía magnética de una magnitud y dirección predeterminadas en la capa, y particularmente en cada elemento de volumen por separado, si es necesario.

El campo magnético externo puede aplicarse al menos durante la etapa de enfriamiento y solidificación, pero también puede aplicarse durante la aplicación de energía electromagnética por la fuente de radiación 5. Sin embargo, cuando se usa un haz de electrones como fuente de radiación 5, el campo magnético externo proporcionado por el generador de campo magnético podría ser de fuerza suficiente para perturbar o afectar el haz de electrones. Si este es el caso, el campo magnético externo puede aplicarse preferentemente durante la etapa de enfriamiento y solidificación y no durante la aplicación de energía electromagnética por la fuente de radiación 5. Esto puede realizarse a través de medios de conmutación adecuados. Alternativamente, si los efectos del campo magnético externo en el haz de electrones son conocidos y pueden caracterizarse, puede ser posible compensar estos efectos con la dirección y/o control del haz mediante el procedimiento de control de fuente de radiación 26.

Se pueden fabricar tipos específicos de estructuras de material magnético usando el aparato descrito. En un ejemplo, la anisotropía magnética puede variar espacialmente a través del material a lo largo de uno o más de los ejes x, y y z para definir una estructura periódica. El campo magnético externo puede rotarse continuamente durante las etapas sucesivas de fusión y enfriamiento, de modo que la estructura tenga una anisotropía magnética giratoria a lo largo de cualquier eje particular. La expresión "anisotropía magnética giratoria" pretende abarcar una estructura en la que una serie de elementos de volumen adyacentes distribuidos a través de la estructura tienen una dirección de anisotropía magnética individual (por ejemplo, eje fácil) que aumenta en ángulo para cada elemento de volumen sucesivo.

La anisotropía magnética giratoria podría proporcionarse como niveles discretos de anisotropía para cada elemento de volumen sucesivo, o podría variar continuamente a través del material, por ejemplo, donde el haz electromagnético viaja continuamente al mismo tiempo que gira el campo magnético.

En un aspecto general, el control del campo magnético externo permite la creación de una estructura de material magnético que tiene un gradiente en una o más direcciones, por ejemplo, en x, y y/o z. Esto puede incluir una torsión/hélice magnética. En otro aspecto general, el control del campo magnético externo permite la creación de una estructura de material magnético en la que los siguientes parámetros de anisotropía se ajustan o controlan en el material en función de la posición dentro del material: (1) la dirección de magnetización (eje fácil); (2) el campo coercitivo, que define la barrera de energía para cambiar la magnetización entre las dos direcciones paralelas al eje fácil y, por lo tanto, la estabilidad de la dirección de magnetización; (3) el campo de saturación que define la fuerza de la anisotropía: cuanto mayor es el campo de saturación, más fuerte es la tendencia de la magnetización a alinearse con el eje fácil.

- Al variar la composición química o elemental de la materia prima en polvo que se dispensa por el dispensador de polvo 3 en función del tiempo, o discretamente para las capas sucesivas 4, también es posible crear estructuras en capas en las que tanto la composición química como la anisotropía magnética varían espacialmente en toda la pieza de trabajo, por ejemplo, en una o más de las direcciones x, y y z. Se pueden estratificar diferentes polvos y composiciones en polvo en el dispensador de polvo 3 antes de que comience la producción. Alternativamente, se podrían usar diferentes cabezales dispensadores de polvo, cada uno con un depósito de materia prima diferente, análoga a los cabezales de impresión de tinta tricolor. La expresión "composición química" se usa a lo largo de la presente memoria descriptiva para abarcar tanto elementos como compuestos y aleaciones de los mismos. La expresión "estructura" se usa en toda la presente memoria descriptiva para abarcar una estructura amorfa, una estructura cristalina, una estructura nanocristalina, así como sus combinaciones. La creación de materiales compuestos amorfos-cristalinos, así como materiales amorfos-nanocristalinos en compuestos de matriz amorfa se puede lograr ajustando la velocidad de enfriamiento o elevando la temperatura del material en capas por encima de T<sub>g</sub>. Esto puede efectuarse ajustando la fuente de radiación (por ejemplo, láser) y/o ajustando el tiempo de exposición.
- Los procedimientos descritos anteriormente generalmente pueden describirse como, o formar parte de, un procedimiento de fabricación aditiva.
- El cuerpo tridimensional completo resultante de la pieza de trabajo creada puede, en consecuencia, tener diferentes estructuras en diferentes partes del cuerpo y consistir en partes amorfas y cristalinas y compuestos de partículas metálicas cristalinas o nanocristalinas en una matriz amorfa. La composición química del cuerpo también se puede variar a lo largo del cuerpo mediante el uso de diferentes polvos para diferentes capas.
- Se puede fabricar un número significativo de nuevas estructuras de material magnético utilizando las técnicas descritas anteriormente.
- En un ejemplo, la estructura de material magnético puede comprender una pluralidad de capas magnéticas (por ejemplo, en la dirección z), con capas seleccionadas de la estructura que tienen una composición química diferente y una anisotropía magnética diferente. Por ejemplo, cada capa de material magnético que se construye a partir de capas de polvo sucesivas 4 puede usar una composición química diferente de polvo, y el campo magnético externo aplicado por el generador de campo magnético 21 para cada capa puede imprimir una anisotropía magnética diferente en cada capa. Los espesores de capa individuales se pueden crear hasta un espesor limitado solo por la capacidad de dispensar una capa delgada de polvo y la profundidad de fusión causada por la fuente de radiación electromagnética. Por lo tanto, los espesores típicos de capas individuales pueden estar en el rango de un espesor mínimo de 1 micrómetro y un espesor máximo de 1000 micrómetros. Los intervalos preferidos pueden incluir espesores de capa de 20-40 micrómetros o 50-70 micrómetros. El rango real de espesores controlables dependerá de la potencia (y el tamaño del haz) del haz de radiación disponible, por ejemplo, haces láser en el rango de 200-400 W o incluso hasta 1 kW, o haces de electrones en el rango de 50-3500 W.
- El haz de radiación puede proporcionarse a una potencia que provoca la fusión de capas previamente procesadas debajo de la capa actual. En este caso, la impresión de la anisotropía magnética por el campo externo aplicado se efectuará en todas las capas fundidas, que pueden comprender más de una capa procesada previamente. Como las capas subsiguientes pueden procesarse de manera similar, la anisotropía magnética impresa final puede aplicarse a espesores de capa similares a los espesores de capa de polvo aplicados, pero una o más capas por debajo de la nueva capa de polvo actual. En otras palabras, el procedimiento de control de campo magnético 24 puede necesitar ser programado para implementar una dirección de campo magnético apropiada para una capa que va una o más capas detrás del procedimiento de control de polvo 25.
- La diferencia en la anisotropía magnética entre capas adyacentes podría comprender una inversión completa de la dirección del campo magnético, o tal vez una rotación de la dirección del campo magnético a través de un ángulo específico, por ejemplo 90 grados, o podría comprender cambios en la dirección del eje fácil. La diferencia en la anisotropía magnética podría comprender una configuración magnética ortogonal ( $\pi/2$ ), dando como resultado una respuesta cercana a la isotrópica de la magnetización, en el plano de las capas. La diferencia en la anisotropía magnética entre capas adyacentes podría comprender un cambio en la magnitud de la magnetización o un cambio en la magnitud de la coercitividad, así como el campo de saturación a través de la selección del material y la intensidad del campo aplicado. Dentro de cada capa, podría haber una anisotropía uniaxial dentro de cualquier dirección de eje fácil predefinida. Las capas adyacentes podrían proporcionarse con la misma anisotropía magnética, cuando se desee, por ejemplo, para construir capas más gruesas de anisotropía uniaxial.
- La estructura del material magnético puede comprender una pluralidad de capas magnéticas (en la dirección z), con capas de la estructura que tienen una composición química idéntica pero una anisotropía magnética diferente.
- Un tipo particular de estructura de material magnético que es útil es uno que tiene una anisotropía magnética en el plano uniaxial, pero el tamaño y/o la dirección de la anisotropía magnética en el plano uniaxial cambian de plano a plano en la estructura de capas múltiples. En un aspecto general, la estructura de material magnético puede

tener una anisotropía magnética uniaxial en el plano diferente en cada plano o al menos en planos adyacentes. El momento magnético puede variar de un plano a otro.

Además, la anisotropía magnética se puede variar dentro de cada capa (es decir, dentro de las direcciones x y/o y) de acuerdo con el campo magnético externo aplicado durante el procedimiento de fusión y enfriamiento de la radiación electromagnética. Esto permite la creación de una estructura de material magnético que tiene al menos una capa que exhibe uno o más cambios escalonados en la anisotropía magnética dentro del plano de la capa, con elementos de volumen individuales de la capa que tienen anisotropía magnética diferente. Las dimensiones típicas de los elementos de volumen para los cuales la anisotropía magnética se puede ajustar individualmente están limitadas solo por el haz mínimo o el tamaño del punto de fusión y enfriamiento por la fuente de radiación electromagnética. Los tamaños de elementos de volumen típicos en x y y pueden estar en el rango de 10 micrómetros a 10000 micrómetros. La diferente anisotropía magnética de elementos de volumen adyacentes (y, por lo tanto, un cambio gradual en la anisotropía magnética entre elementos de volumen adyacentes) podría comprender una inversión completa de la dirección del campo magnético, o una rotación de la dirección del campo magnético, por ejemplo, 90 grados, o podría comprender cambios regulares o controlados en la dirección del eje fácil (a diferencia de los cambios aleatorios que podrían ocurrir naturalmente a través de los límites de grano). La diferencia en la anisotropía magnética entre elementos de volumen adyacentes (y, por lo tanto, un cambio de etapa en la anisotropía magnética entre elementos de volumen adyacentes) podría comprender un cambio en la magnitud de la magnetización o un cambio en la magnitud de la coercitividad o el campo de saturación, o un cambio en el momento magnético. Dentro de cada elemento de volumen puede haber anisotropía uniaxial. Los elementos de volumen adyacentes también podrían proporcionarse con la misma anisotropía magnética, donde se desee.

Por lo tanto, en un aspecto general, las técnicas descritas permiten localizar las características de la anisotropía magnética en lugares específicos, por ejemplo, elementos de volumen y capas, en la estructura del material magnético.

Las técnicas anteriores permiten la creación de una estructura de material magnético que tiene una periodicidad en anisotropía magnética en una o más de las direcciones x, y o z, donde la periodicidad puede tener una periodicidad espacial de hasta 10 micrómetros, y más generalmente una periodicidad en el rango de 1 a 10000 micrómetros. Por lo tanto, la estructura puede exhibir una periodicidad regular en anisotropía magnética a lo largo de una dirección dentro de los planos x-y y una periodicidad regular en anisotropía magnética transversal a los planos x-y.

Usando las técnicas descritas anteriormente, las estructuras de material magnético se pueden crear con las distribuciones espaciales descritas de anisotropía magnética dentro de una estructura unitaria que puede ser una estructura metálica amorfa, una estructura nanocristalina o una estructura policristalina, o regiones especialmente controladas de más de uno de éstos dentro de la estructura del material magnético. El procedimiento de fusión en polvo descrito anteriormente puede lograr relaciones sólido a vacío de más del 99% y, en algunos casos, mejor del 99,9%.

Se pueden hacer varias modificaciones al aparato de la Figura 1.

La Figura 2 muestra un diagrama esquemático de un aparato similar configurado para agregar material metálico magnético a un cuerpo 13 existente de metal amorfo o cristalino. El cuerpo 13 se coloca en la mesa de trabajo 1 y se incrusta en un polvo 14 con alta conductividad térmica. Además, el cuerpo puede estar rodeado por bobinas de enfriamiento 15 a través de las cuales puede fluir líquido refrigerante o refrigerante. En consecuencia, la mesa de trabajo 1, así como el cuerpo 13, pueden enfriarse. El procedimiento es sustancialmente el mismo que el descrito anteriormente en relación con la Figura 1. Se aplica una capa de polvo metálico 4 sobre el cuerpo 13 que puede considerarse como el sustrato, y la capa se fusiona sucesivamente al área del cuerpo por área mientras se enfría, al mismo tiempo que se aplica un campo magnético externo mediante el aparato de generación de campo magnético 21.

En otra disposición, el aparato se puede modificar para que el polvo se dispense al mismo tiempo que se produce el procedimiento de fusión. En esta disposición, la radiación electromagnética para derretir el polvo puede dirigirse al polvo en el momento y lugar de dispensación. La fuente de radiación 5 se puede acoplar o desplazar con el dispensador de polvo 3 para que el polvo se derrita cuando se encuentre con el sustrato o la pieza de trabajo, o inmediatamente antes de que impacte el sustrato o la pieza de trabajo. En un ejemplo, el dispensador de polvo 3 puede incluir una boquilla y la energía electromagnética puede dirigirse al polvo en la boquilla o inmediatamente adyacente a la boquilla donde existe el material en polvo y cerca del sustrato, por ejemplo, la pieza de trabajo. Por lo tanto, en un aspecto general, las etapas de (i) dirigir una capa de material metálico en polvo sobre un sustrato conductor de calor y (ii) aplicar suficiente energía electromagnética al material en polvo para fundir el material en polvo, pueden ocurrir simultáneamente.

Este enfoque permitiría variar la composición química dentro de una capa dispensada particular, en lugar de solo de capa a capa, ya que el polvo dispensado puede variarse durante el tiempo de dispensación, como se discutió

anteriormente.

Aunque se ha descrito una realización del aparato usando un generador de campo magnético 21 que es capaz de girar alrededor de la mesa de trabajo 1 para cambiar la dirección del campo magnético externo, también es posible cambiar la dirección del campo magnético externo mediante rotación relativa de la pieza de trabajo y el generador de campo magnético, por ejemplo, por rotación de la pieza de trabajo. Esto puede ir acompañado del control necesario de la fuente de radiación para mantener una posición requerida con respecto a la pieza de trabajo.

En otra disposición, el aparato generador de campo magnético 21 podría estar unido y viajar con el dispensador de polvo 3 y/o la fuente de radiación 5, proporcionando así una aplicación más localizada del campo magnético externo. Por ejemplo, un electroimán cuadrupolo rotativo podría estar conectado a un "cabezal de escritura" móvil que está configurado para depositar polvo, proporcionar energía de fusión con una fuente de radiación y aplicar el campo magnético externo para imprimir anisotropía magnética en la dirección requerida, con cada pasada sobre la pieza de trabajo.

Más generalmente, en todas las disposiciones descritas anteriormente, el campo magnético externo puede proporcionarse en el plano o fuera del plano de las capas 4. Por lo tanto, puede tener un ángulo de acimut variable en el plano x-y, y/o un ángulo de elevación variable en relación con el plano x-y de la capa de mesa de trabajo/pieza de trabajo/material en polvo 4.

Se pueden fabricar varias partes de la mesa de trabajo y estructuras adyacentes a la misma a partir de cualquier material adecuado que no influya indebidamente en el campo magnético externo proporcionado por el generador de campo magnético 21 que incide en la pieza de trabajo.

## Ejemplo

La Figura 3 muestra una disposición ejemplar utilizada para construir una estructura magnética 31 en forma de un cilindro hueco con un radio exterior de 5 mm y un radio interior de 2,5 mm. La mesa de trabajo 32 formaba parte de un sistema de fusión de cama de polvo basado en láser, modelo EOS M270, modificado para proporcionar impresión de anisotropía magnética durante un procedimiento de fabricación aditiva como se discutió anteriormente. La mesa de trabajo 32 comprendía una plataforma circular 33 de radio 22,5 mm y espesor 5 mm, con una porción cilíndrica vertical 34 que tenía una superficie superior 36 de radio 12,5 mm y espesor de 2 mm. Esta superficie superior 36 sirvió como sustrato conductor de calor para el procedimiento de fabricación como se describió anteriormente. La porción cilíndrica 34 tenía un volumen interno de 20 mm de diámetro y 15 mm de altura. En la porción cilíndrica 34 se recibió un aparato generador de campo magnético en forma de un imán permanente 35 de 14 mm de diámetro. El imán permanente 35 estaba formado por una aleación AlNiCo. Se colocó una capa de lana cerámica 37 entre el imán 35 y la parte inferior de la superficie superior 36.

La estructura magnética 31 se fabricó, capa por capa, a una altura de aproximadamente 7 mm usando una composición de material en polvo de Fe74Mo4P10C7.5B2.5Si2 (% atómico) que se dirigió sobre el sustrato, se fundió mediante la aplicación de energía electromagnética y se enfrió para formar una capa sólida mientras estuvo dentro del campo magnético externo aplicado por el imán 35.

Después del procesamiento, la estructura magnética 31 se retiró del sustrato 36, se cortó y se pulió. La anisotropía magnética de una rebanada de la muestra se caracterizó utilizando un equipo basado en el efecto Kerr magnetoóptico (MOKE). La Figura 4 muestra el resultado de estas mediciones. En la Figura 4, 0° (indicado con las líneas 41) designa el eje magnético fácil y 90° (indicado con las líneas 42) designa el eje duro magnético, es decir, correspondiente a la dirección de construcción vertical y la dirección horizontal respectivamente para la estructura magnética 31. La asimetría en la medición de 90° (líneas 42) es un artefacto debido al movimiento de la muestra. Al comparar las dos direcciones de medición, está claro que se requiere un campo más grande para saturar la magnetización en la dirección de 90° que en la dirección de 0° y, por lo tanto, la muestra es magnéticamente anisotrópica.

En la práctica, puede haber dificultades al usar un imán permanente 35 para crear el campo externo en combinación con los sistemas convencionales de fusión de cama de polvo. Esto puede deberse a interacciones magnéticas con la cama de polvo que reducen la fluidez del polvo y dificultan la extensión de una capa de buena calidad (por ejemplo, de espesor suave y uniforme). Sin embargo, puede ser posible resolver esto usando un electroimán para crear un campo que atenué temporalmente el campo desde el imán permanente durante la dispensación de la capa de polvo. Alternativamente, como se discutió anteriormente, se puede usar un electroimán que solo esté activo durante la fase de fusión y enfriamiento.

Si se está construyendo un imán duro como la estructura magnética 31, es decir, una construcción de una estructura magnética que crea su propio campo magnético, utilizando el sistema de fusión de cama de polvo descrito anteriormente, también podría usarse un electroimán para atenuar el campo intrínseco de la estructura magnética al mismo tiempo que se está construyendo, si es necesario.

## REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de control de anisotropía magnética en un material magnético que comprende etapas de:
- 5 i) dirigir una capa de material metálico en polvo a un sustrato conductor de calor;  
 ii) aplicar suficiente energía electromagnética al material en polvo para fundir todo el espesor de la capa de material en polvo en una o más áreas seleccionadas que definen elementos de volumen;  
 iii) posteriormente enfriar el material fundido para crear una capa sólida sobre el sustrato,  
 iv) aplicar un campo magnético externo al material durante al menos la etapa iii) para imprimir la capa de material magnético sólido con anisotropía magnética,
- 10 en el que el enfriamiento del material fundido es controlado de acuerdo con un perfil de velocidad de enfriamiento predeterminado para obtener una cristalinidad deseada y/o estructura amorfa a los elementos de volumen de la capa sólida formada a partir del material fundido.
2. El procedimiento según la reivindicación 1, que además comprende una etapa de aplicar la energía electromagnética solamente a elementos de volumen seleccionados de la capa durante la etapa ii) para crear de ese modo una variación espacial de la anisotropía magnética impresa dentro de la capa.
- 15 3. El procedimiento según la reivindicación 2, que además incluye repetir las etapas ii), iii) y iv) en diferentes elementos de volumen seleccionados de la capa para crear de ese modo una variación espacial de la anisotropía magnética impresa dentro de la capa.
- 20 4. El procedimiento según la reivindicación 3 en el que las etapas ii), iii) y iv) se repiten usando diferente dirección y/o magnitud de campo magnético externo.
5. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que el campo magnético externo aplicado se varía durante al menos la etapa iii) controlando de ese modo la anisotropía magnética impresa dentro de la capa para crear una variación espacial de la anisotropía magnética impresa.
- 25 6. El procedimiento según la reivindicación 5, en el que el campo magnético externo aplicado se varía girando el campo magnético.
7. El procedimiento según la reivindicación 1, que además incluye repetir las etapas i) a iv) para construir capas sucesivas de material magnético cada una impresa con anisotropía magnética.
- 30 8. El procedimiento según la reivindicación 7, que además incluye variar la composición de material metálico en polvo para las capas sucesivas.
9. El procedimiento según la reivindicación 7 u 8, que incluye variar la dirección y/o magnitud del campo magnético externo aplicado para las capas sucesivas.
- 35 10. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que la etapa i) comprende disponer la capa de material metálico en polvo sobre el sustrato, y la etapa ii) se lleva a cabo cuando el material metálico en polvo está dispuesto sobre el sustrato.
- 40 11. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que las etapas i) y ii) se llevan a cabo de manera sustancialmente simultánea disponiendo el material metálico en polvo desde una boquilla mientras se aplica energía electromagnética para fundir dicho material en o adyacente a la boquilla.
12. El procedimiento según la reivindicación 1 en el que el campo magnético externo varía en uno o más espacios y tiempos durante la etapa iv) o para ocurrencias sucesivas de la etapa iv).
- 45 13. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que el procedimiento es, o está incorporado dentro de, un procedimiento de fabricación aditiva.
14. Un aparato para producir un material magnético con anisotropía magnética controlada que comprende:
- 50 un dispensador de polvo configurado para dirigir una capa de material metálico en polvo sobre o hacia un sustrato conductor de calor;  
 una fuente de radiación configurada para dirigir energía electromagnética al material en polvo sobre o cerca del sustrato conductor de calor, suficiente para derretir todo el espesor de la capa de material en polvo en una o más áreas seleccionadas que definen elementos de volumen;

un mecanismo de enfriamiento para enfriar el material fundido en el sustrato conductor de calor, el mecanismo de enfriamiento comprende un procedimiento de control de enfriamiento configurado para proporcionar perfiles de velocidad de enfriamiento específicos y variables de acuerdo con una cristalinidad objetivo deseada o estructura amorfa de los elementos de volumen;

5

un aparato generador de campo magnético configurado para aplicar un campo magnético al material fundido sobre el sustrato conductor de calor para imprimir una capa sólida de material magnético resultante del material fundido enfriado con anisotropía magnética.

10

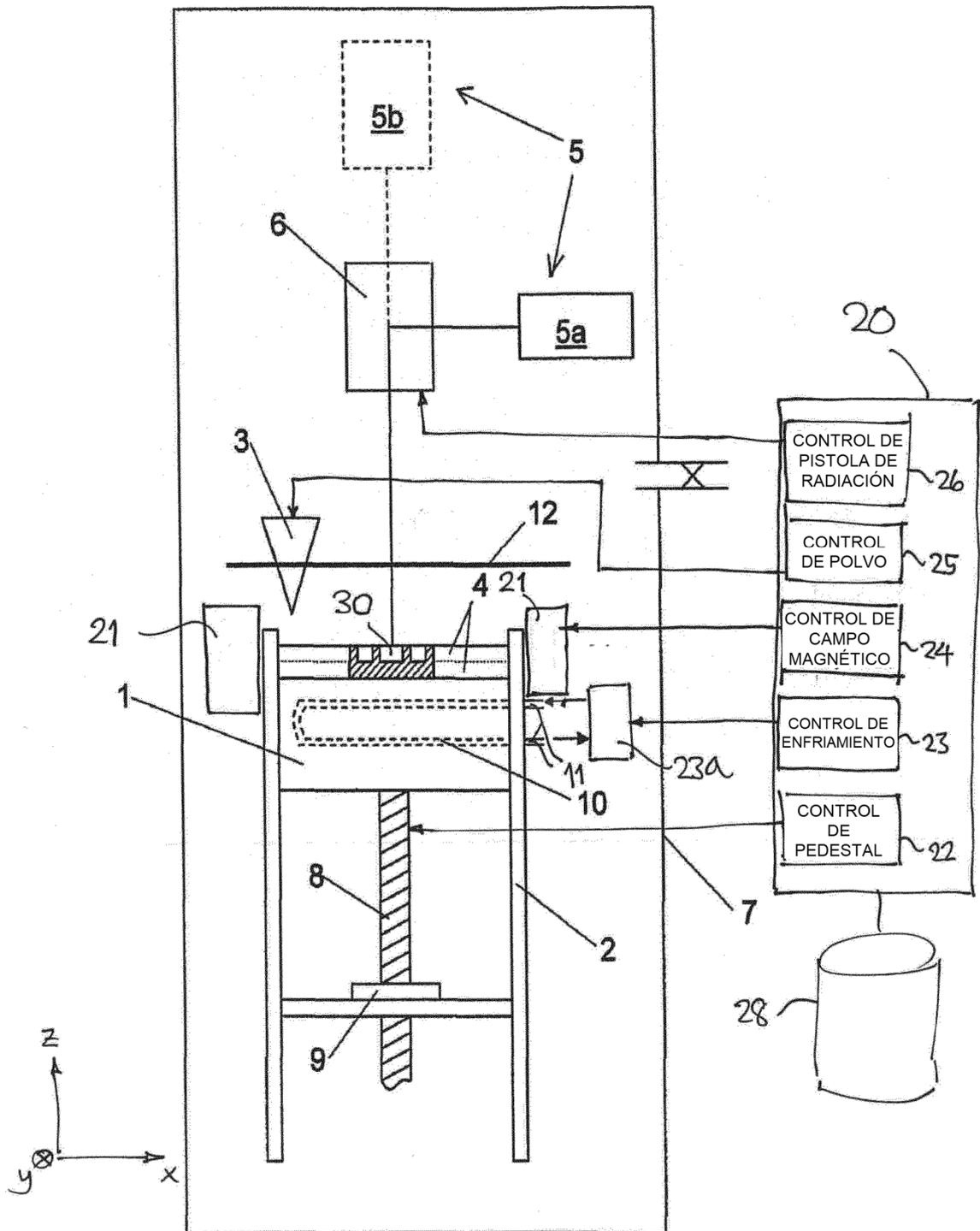


Figura 1

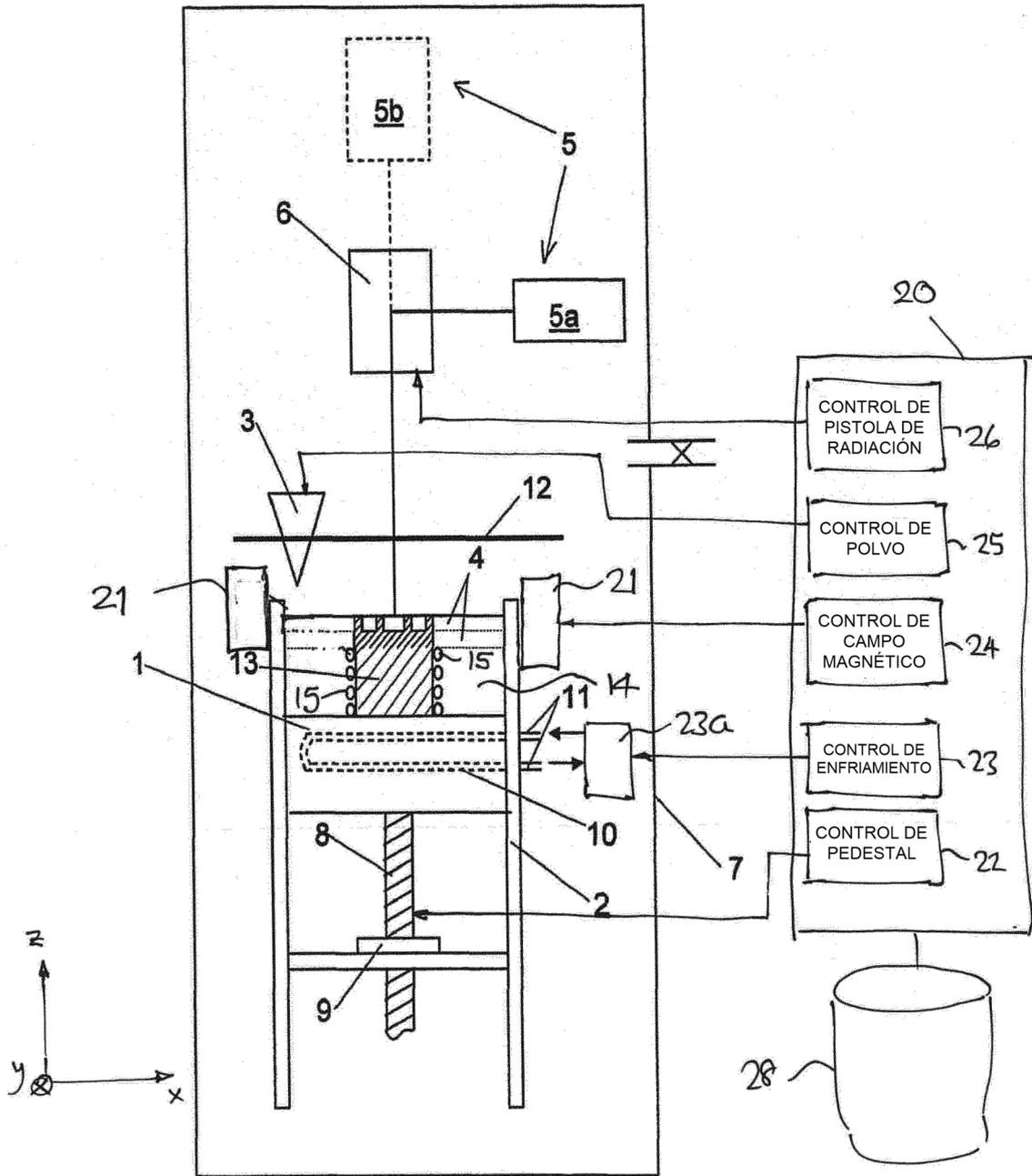


Figura 2

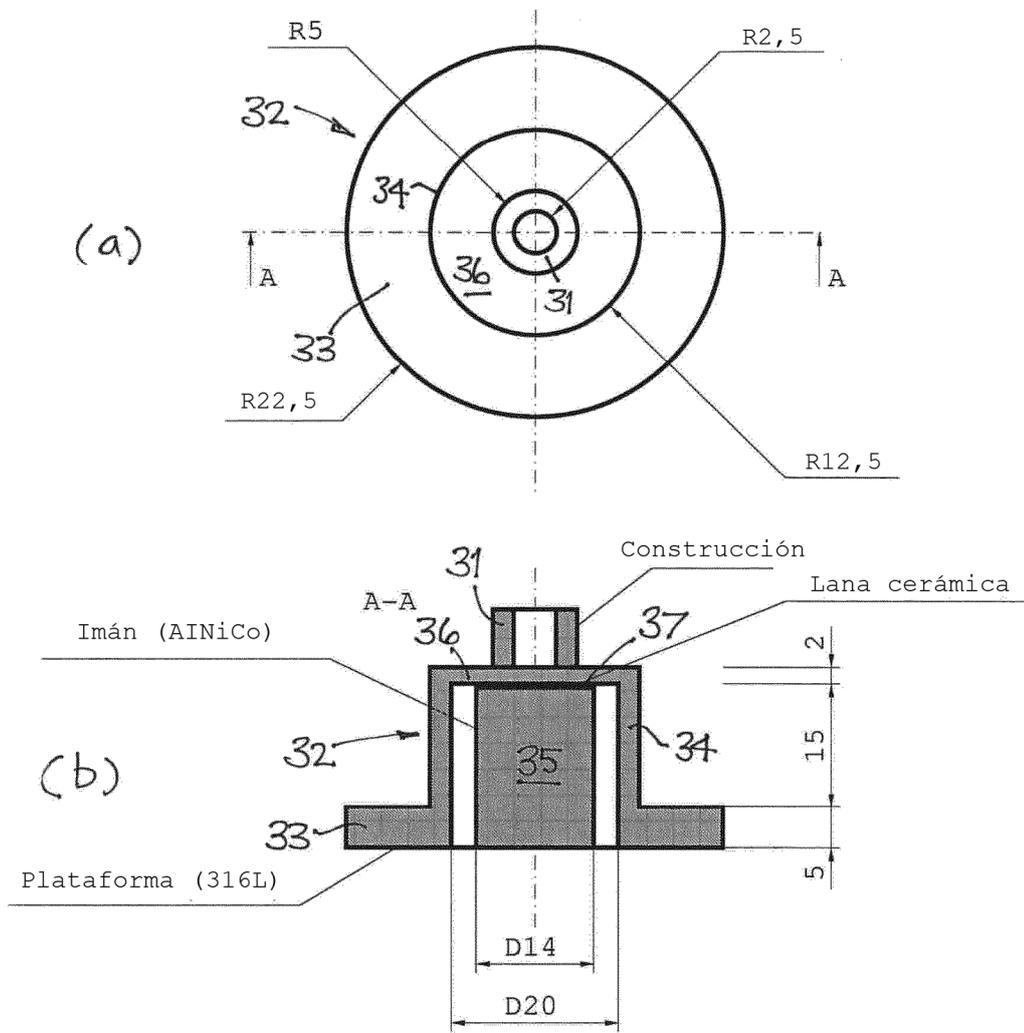
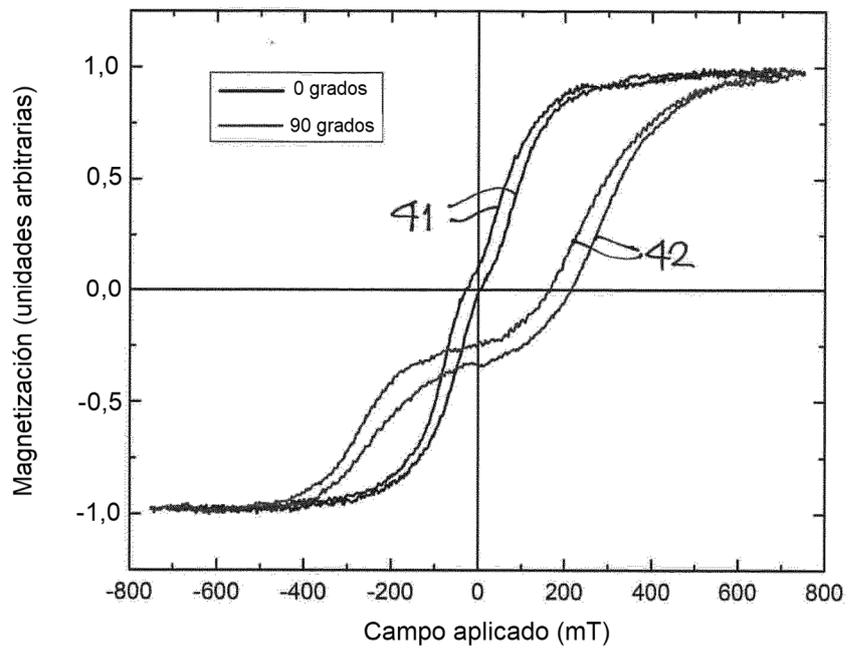


Figura 3



**Figura 4**