

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 543 652**

21 Número de solicitud: 201400015

51 Int. Cl.:

C22C 23/02 (2006.01)

B22F 3/00 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

30.12.2013

43 Fecha de publicación de la solicitud:

20.08.2015

56 Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2014/000223

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD DE SEVILLA (62.0%)
OTRI-Pabellón de Brasil, Paseo de las Delicias
s/n
41013 Sevilla ES y
UNIVERSIDAD DE HUELVA (38.0%)**

72 Inventor/es:

**MONTES MARTOS, Juan Manuel;
CINTAS FÍSICO, Jesús;
GÓMEZ CUEVAS, Francisco y
TERNERO FERNÁNDEZ, Fátima**

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ CARVAJAL, Ramón

54 Título: **Método para la fabricación pulvimetalúrgica de imanes**

57 Resumen:

La presente patente tiene por objeto presentar un nuevo método para la fabricación pulvimetalúrgica de imanes (aplicable especialmente a la fabricación de imanes que contienen tierras raras). Lo novedoso del método reside en el empleo de alguna modalidad de consolidación eléctrica (como la denominada sinterización por resistencia eléctrica, S.R.E., o la denominada consolidación por descarga eléctrica, C.D.E., pero no necesariamente una de éstas) en sustitución de la ruta convencional de prensado en frío + sinterizado, empleada habitualmente. Se logra con ello: (1) aunar las etapas de compactación/sinterizado, acortando significativamente su duración y reduciendo la magnitud de las presiones de trabajo, (2) llevar a cabo las etapas de alineamiento magnético, prensado/sinterizado, tratamiento térmico y magnetización en una misma matriz, y (3) hacer innecesario el empleo de atmósferas protectoras durante el proceso de sinterizado.

ES 2 543 652 A1

DESCRIPCIÓN

MÉTODO PARA LA FABRICACIÓN PULVIMETALÚRGICA DE IMANES

OBJETO DE LA INVENCION

5 Esta invención técnica corresponde al área científico-técnica de la "tecnología de materiales" y el sector de actividad al que se aplicaría es el de la fabricación de imanes permanentes a partir de polvos.

El objeto de esta patente es mostrar un método alternativo de fabricación de imanes, especialmente indicada para los que incluyen en su composición tierras raras, que no modifica los procesos magnéticos, pero sí los relativos al conformado, sustituyendo el
10 método convencional (prensado en frío seguida de sinterizado en horno) por un nuevo método de consolidación consistente en cualquier modalidad rápida de consolidación eléctrica o técnica FAST (*Field Assisted Sintering Technique*), del que se derivan notables ventajas: mayor brevedad, unificación de los procesos de prensado/sinterizado
15 en una única etapa, empleo de presiones bajas, ausencia de atmósferas controladas y posibilidad de realizar los procesos de alineamiento magnético, prensado/sinterizado, tratamiento térmico y magnetización permaneciendo el polvo en una misma matriz. Todo ello concebido para lograr, principalmente, una reducción importante del coste de fabricación del imán.

20

ESTADO DE LA TÉCNICA

A diferencia de los materiales magnéticos blandos, los *imanes* son materiales magnéticos duros que no se desmagnetizan fácilmente una vez que han sido magnetizados,
25 proporcionando así un campo magnético estable, aprovechable tecnológicamente, que no se ve afectado por campos magnéticos externos. Los imanes se caracterizan por un elevado campo coercitivo (*coercitividad*) y una elevada inducción remanente (*remanencia*), lo que se traduce en también un elevado *producto energía* [J.W. Fiepke, Permanent Magnet Materials, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-
30 Purpose Materials", Vol 2, ASM Handbooks, ASM International, 1990, p. 782-803]. Tales características se consiguen con un meticuloso proceso de fabricación. El proceso es más elaborado aún si el imán contiene tierras raras. El desarrollo de este tipo de imanes se inició a principios de la década de 1960, cuando Nesbitt y Wernicke [(E.A. Nesbitt, H.J. Williams, J.H. Wernicke, R.C. Sherwood, J. Appl. Phys., Vol 32S, 1961, p 342-343); (E.A.
35 Nesbitt, H.J. Williams, J.H. Wernicke, R.C. Sherwood, J. Appl. Phys., Vol 33, 1962, p 1674-1678); (J.H. Wernicke, S. Geller, Acta Cryst., Vol 12, 1959, p 662-665)]

establecieron la estructura, momento magnético y temperatura de Curie de los compuestos intermetálicos de cobalto/tierras-raras.

El proceso convencional para la fabricación de imanes (por ejemplo, de aquellos que contienen tierras raras) parte de un polvo de una elevada anisotropía cristalina intrínseca (por ejemplo, debida a una estructura cristalina con celdilla hexagonal), composición muy específica y granulometría muy concreta (el tamaño medio de las partículas debe ser comparable al diámetro crítico de una partícula monodominio, entre 1 y 10 μm , y, además, la distribución de tamaños debe ser muy estrecha [(K.H. Moyer, *Magnetic Materials and Properties for Powder Metallurgy Part Applications*, "Powder Metal Technologies and Applications", Vol 7, ASM Handbook, ASM International, 1998, 1006-1020); (N.A. Spaldin, "Magnetic Materials: Fundamentals and Applications", 2nd edition, Cambridge University Press, 2011, USA, 3-144)].

Este polvo, o una mezcla de diferentes tipos de ellos, es expuesto a un fuerte campo magnético ($\sim 2 - 5 \text{ MA/m}$) con objeto de forzar el alineamiento magnético de las partículas que lo constituyen (forzando, por ejemplo, que preferentemente el eje c de las celdillas hexagonales de las partículas monocristalinas sea paralelo a la dirección del campo aplicado); con ello se consigue que la magnetización de la pieza final pueda ser la más alta posible [F.V. Lenel, "Powder Metallurgy: Principles and Applications", Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1980, p. 531-548)].

Tras este proceso de alineamiento magnético, el polvo alineado es sometido a compresión en frío (con presiones que oscilan entre 700 y 1500 MPa) con objeto de compactarlo. Este proceso de compactación puede hacerse de diferentes modos: por prensado en matriz (en inglés, *Cold Die Pressing*, *CDP*) o por prensado isostático en frío (*Cold Isostatic Pressing*, *CIP*). Cuando el prensado se realiza en matriz, el polvo puede permanecer confinado en la misma matriz durante las etapas de alineamiento y de compactación. Cuando el prensado es isostático, el sistema de compresión impone limitaciones que obligan a que el alineamiento deba realizarse previamente a la introducción en la prensa, confinándolo normalmente en un envase de plástico. Aunque en teoría, si la modalidad elegida es la de prensado en matriz, el alineamiento magnético puede realizarse en la misma matriz de compactación, las elevadas presiones empleadas hace necesarias matrices muy grandes, que alejan la bobina de magnetización del polvo, aminorando el campo magnético aplicado. Si el alineamiento es realizado de forma independiente, la bobina puede estar más próxima al polvo y aplicar campos mayores que mejoran el grado de alineamiento de las partículas, y con ello, las propiedades magnéticas de las piezas finales. Es por ello, que generalmente el alineamiento y el prensado se desarrollan en matrices diferentes [(J.W. Fiepk, *Permanent Magnet*

Materials, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", Vol 2, ASM Handbooks, ASM International, 1990, p. 782-803); (K.H. Moyer, Magnetic Materials and Properties for Powder Metallurgy Part Applications, "Powder Metal Technologies and Applications", Vol 7, ASM Handbook, ASM International, 1998, 1006-1020); F.V. Lenel, "Powder Metallurgy: Principles and Applications", Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1980, p. 531-548)].

Tras el proceso de compactación las piezas obtenidas pueden alcanzar una densidad relativa del orden del 80%. Estos compactos en verde son entonces sinterizados en horno, en atmósfera apropiada (usualmente, argón) a temperaturas que rondan los 1100 °C. Tras el sinterizado, la densidad relativa puede aumentar hasta aproximadamente el 90%.

Aunque menos habitual, los polvos pueden también ser conformados en caliente mediante la técnica de prensado isostático en caliente, *Hot Isostatic Pressing*, HIP. Se añadan con ello la etapa de prensado y sinterización, pero no el proceso de alineamiento, que debe seguir haciéndose de modo independiente [J.W. Fiepke, Permanent Magnet Materials, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", Vol 2, ASM Handbooks, ASM International, 1990, p. 782-803]. El principal inconveniente de esta técnica, es su elevado coste y su bajo nivel de producción.

Tras el sinterizado, es habitual la aplicación de algún tratamiento térmico (en torno a los 900 °C) destinado a mejorar la coercitividad del material. Dichos tratamientos térmicos persiguen, en general, la nucleación, fijación y anclaje de las paredes de los dominios magnéticos en las superficies y límites de grano del material, lo que aumenta sustancialmente la fuerza coercitiva [K.H. Moyer, Magnetic Materials and Properties for Powder Metallurgy Part Applications, "Powder Metal Technologies and Applications", Vol 7, ASM Handbook, ASM International, 1998, 1006-1020].

Finalmente, las piezas son magnetizadas aplicando nuevamente un campo magnético intenso (de unos 5 MA/m). Debido a la alta remanencia y alta coercitividad de algunos tipos de imanes así procesados, el proceso de magnetización puede llegar a ser bastante difícil. A menudo resulta más eficiente magnetizar mediante la aplicación de pulsos de corta duración, pero más intensos, lo que se ha revelado como una técnica eficaz para mover y arrastrar las paredes de los dominios magnéticos, posibilitando así el aumento de la magnetización.

Eventualmente tras este tratamiento, algunas piezas (especialmente las que tienen al hierro entre sus componentes) deben ser recubiertas con objeto de mejorar su resistencia a la corrosión. Los métodos de recubrimiento pueden ser muy diversos [(J.W. Fiepke, Permanent Magnet Materials, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and

Special-Purpose Materials”, Vol 2, ASM Handbooks, ASM International, 1990, p. 782-803); (K.H. Moyer, Magnetic Materials and Properties for Powder Metallurgy Part Applications, “Powder Metal Technologies and Applications”, Vol 7, ASM Handbook, ASM International, 1998, 1006-1020)], entre los que cabe citar, como ejemplos, el galvanizado y el cromado.

Aun cuando la tecnología pulvimetalúrgica actual de fabricación de imanes permanentes puede considerarse satisfactoria en muchos sentidos, serían deseables ciertas mejoras encaminadas a simplificar el proceso y que redujesen significativamente los costes de producción. La técnica de fabricación propuesta en esta solicitud de patente persigue satisfacer este reto.

EXPLICACION DE LA INVENCION

Constituye el objeto de la presente invención un método para la fabricación pulvimetalúrgica de imanes que comprende como etapa inicial la introducción de un material pulverulento que contiene al menos un elemento magnético seleccionado entre Fe, Co, Ni en una matriz; una vez introducido el material pulverulento en la matriz se somete secuencialmente y siempre en la misma matriz a alineamiento magnético, proceso de consolidación eléctrica, tratamiento térmico, refrigeración y magnetización.

En un modo de realización particular, el material pulverulento contiene adicionalmente al menos un elemento de los denominados tierras raras.

En ulteriores modos preferentes de realización el material pulverulento se mezcla con al menos un segundo material pulverulento de composición diferente y que comprende al menos un primer elemento que se selecciona entre Fe, Co, Ni. Este segundo material pulverulento puede comprender al menos un segundo elemento que se selecciona entre los denominados tierras raras.

Se exponen a continuación las opciones para la puesta en práctica de las etapas que constituyen el procedimiento:

- 1) El alineamiento magnético se realiza exponiendo el material pulverulento a la acción de un campo magnético.
- 2) El proceso de consolidación eléctrica se puede ejecutar:
 - mediante la técnica de sinterización por resistencia eléctrica, particularmente de media frecuencia.
 - mediante la técnica de consolidación por descarga eléctrica.

- mediante la aplicación secuencial de las técnicas de consolidación por descarga eléctrica y sinterización por resistencia eléctrica o a la recíproca, primero sinterización y después descarga.

5 3) El tratamiento térmico del material posterior a la consolidación eléctrica se realiza mediante el paso de corriente eléctrica a través del material.

4) La etapa de refrigeración tras el tratamiento térmico se lleva a cabo por contacto con los electrodos enfriados mediante un líquido refrigerante.

5) La etapa de magnetización del material se efectúa por acción de un campo magnético que permita alcanzar la saturación magnética del material.

10 Opcionalmente, las etapas se realizan en condiciones de atmósfera controlada, particularmente en atmósfera de gas inerte o en vacío.

DESCRIPCIÓN DE LA FIGURA

15 **Figura 1:** Esquema del equipo propuesto para la fabricación de imanes pulvimetalúrgicos por consolidación eléctrica. La matriz contenedora del polvo es única, y en ella el polvo es alineado magnéticamente, consolidado eléctricamente, eventualmente tratado térmicamente y finalmente magnetizado.

20 DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La fabricación de imanes (especialmente de aquellos que contienen elementos de tierras raras) es una tarea compleja, multietapa, que incluye tanto procesos magnéticos (alineamiento magnético de partículas y magnetización de la pieza final) como procesos de conformado (prensado en frío, sinterizado y tratamientos térmicos), algunos de los
 25 cuales exigen un riguroso control de la atmósfera empleada para evitar contaminaciones indeseables. Debido al alto costo de la materia prima (las tierras raras son caras) y a su complicado proceso de fabricación, el costo final de estos imanes resulta muy elevado y prohibitivo, en muchos casos, para determinadas aplicaciones.

El objeto de la invención, es un procedimiento para la fabricación pulvimetalúrgica de
 30 imanes, especialmente indicada para los que incluyen en su composición tierras raras, que no modifica los procesos magnéticos, pero sí los relativos al conformado, sustituyendo el procedimiento convencional (prensado en frío seguida de sinterizado en horno) por un nuevo método de consolidación consistente en cualquier modalidad rápida de consolidación eléctrica o técnica FAST (*Field Assisted Sintering Technique*), del que
 35 se derivan notables ventajas: mayor brevedad, unificación de los procesos de prensado/sinterizado en una única etapa, empleo de presiones bajas, ausencia de

atmósferas controladas y posibilidad de realizar los procesos de alineamiento magnético, prensado/sinterizado, tratamiento térmico y magnetización permaneciendo el polvo en una misma matriz. Todo ello concebido para lograr, principalmente, una reducción importante del coste de fabricación del imán.

- 5 La presente invención tiene por objeto presentar un nuevo método de fabricación de imanes (aplicable especialmente a la fabricación de imanes que contienen tierras raras). Lo novedoso del método reside en el empleo de técnicas de consolidación eléctrica (como la denominada sinterización por resistencia eléctrica, S.R.E., o la denominada consolidación por descarga eléctrica, C.D.E., que se mencionan a efectos ilustrativos, no
10 limitativos) en sustitución del procedimiento convencional de prensado en frío + sinterizado, empleada habitualmente. Se logra con ello: (1) aunar las etapas de compactación/sinterizado, acortando significativamente su duración y reduciendo la magnitud de las presiones de trabajo, (2) llevar a cabo las etapas de alineamiento magnético, prensado/sinterizado, tratamiento térmico y magnetización en una misma
15 matriz, y (3) hacer innecesario el empleo de atmósferas protectoras durante el proceso de sinterizado.

Las técnicas de consolidación eléctricas (las conocidas genéricamente como técnicas FAST no solo permiten aunar las etapas de prensado en frío y sinterizado en horno en una sola etapa, sino que también logran reducir su duración, de tal modo que se
20 hace innecesario el empleo de atmósferas inertes (el tiempo en que el polvo está expuesto a las altas temperaturas es demasiado breve para que transcurran las reacciones de oxidación no deseables), y el proceso puede llevarse a cabo al aire. La reducción del tiempo puede llegar a ser muy considerable: si el proceso conjunto de prensado en frío (en matriz o isostático) y sinterizado en horno puede ocupar en torno a
25 30-60 minutos, la consolidación eléctrica puede llevar tan solo unos pocos segundos, o incluso menos aún, dependiendo de la modalidad concreta empleada. A modo de ejemplo, cabe decir que las dos modalidades antes mencionadas, la S.R.E. y la C.D.E., tienen duraciones características en torno al segundo y al milisegundo, respectivamente, y fuentes de potencia eléctrica también diferentes: en la S.R.E., un transformador que
30 proporciona baja tensión, ~ 10 V, y alta intensidad, ~ 5 - 20 kA, y en la C.D.E., un banco de condensadores, capaz de suministrar durante su descarga, tensiones de ~ 50 - 300 V, e intensidades de 1 - 5 kA. La S.R.E. puede emplear corriente eléctrica de baja frecuencia (50 Hz) o media frecuencia, en torno a 1000 Hz.

Dado que las técnicas de consolidación eléctricas son en el fondo cierto tipo de
35 prensado en caliente, se requieren presiones de trabajo mucho menores (< 100 MPa) que las empleadas en el prensado en frío del procedimiento convencional (entre 700 y 1500

MPa). De este modo, con la consolidación eléctrica, las matrices pueden tener paredes considerablemente más finas, lo que hace posible, además, que la bobina empleada para el alineamiento magnético y, eventualmente, la magnetización, pueda ceñirse más al polvo, permitiendo que este no solo reciba un campo magnético más intenso, sino que también pueda ser alineado magnéticamente en la misma matriz donde posteriormente será consolidado, tratado térmicamente y, eventualmente, también magnetizado.

El tratamiento térmico previo a la magnetización final puede llevarse a cabo por paso de una corriente eléctrica a través del material, de una intensidad tal que provoque por efecto Joule el calentamiento necesario de la pieza. En general, el valor de esta intensidad será menor que la empleada durante la etapa de consolidación. El enfriamiento se llevará a cabo merced a la refrigeración de la que deben constar las bancadas de la máquina en contacto con los electrodos/punzones. Eventualmente, para la realización de esta etapa podría emplearse atmósfera controlada, mediante el arreglo experimental adecuado.

Un esquema del equipo de consolidación eléctrica, especialmente en lo concerniente a los detalles de la matriz es el mostrado en la Figura 1, que se presenta a efectos ilustrativos, no limitativos:

- La matriz es eléctricamente aislante, por ejemplo, fabricada con roca natural, hormigón refractario, tubo cerámico y zuncho de metal, etc.
- Los electrodos serán de alguna aleación de cobre con elevada conductividad por ejemplo, aleación de Cu-Zr. Para conseguir mayor uniformidad en la temperatura interior, puede ser interesante interponer entre el polvo y el electrodo una oblea de material algo menos conductor, por ejemplo, una pseudoaleación (*heavy metal*) de Cu-W, que además aportará resistencia a la electroerosión.
- En el caso de la S.R.E., la fuente de potencia puede consistir en un transformador de soldadura que proporcione intensidades corriente en el rango de 2 a 12 kA, ya sea con frecuencia de red a 50 Hz o mejor aún, con frecuencias mayores, en el rango de las frecuencias medias en torno a los 1000 Hz. Una segunda posibilidad en el caso de la C.D.E. podría consistir en el empleo como fuente de potencia de un banco de condensadores, de gran capacidad y tensiones de carga en el rango de los 50 a 500 V. Otra posibilidad es operar con ambos tipos de fuentes, por ejemplo, en una aplicación secuencial de las mismas: primero descarga por condensadores, luego actúa el transformador de soldadura. Esta última posibilidad puede tener la ventaja de permitir el abordaje de piezas de tamaño mayor, cuya

resistencia eléctrica es demasiado elevada para ser abordadas únicamente por la técnica de S.R.E.

- El dispositivo mecánico que ejerza la presión debe ser capaz de suministrar la fuerza necesaria para alcanzar presiones en torno a 100 MPa.
- 5
- La bobina que envuelve a la matriz irá conectada a una fuente adicional de potencia, que puede beneficiarse de los procedimientos habitualmente empleados a tal efecto, por ejemplo, la magnetización por impulsos, que se menciona a efectos ilustrativos, pero no limitativos. Esta bobina será la responsable de aplicar el campo magnético de alineamiento de partículas y de magnetización de la pieza ya consolidada.
- 10

MODO DE REALIZACIÓN DE LA INVENCION

Como ejemplo ilustrativo de la novedad de la invención, se analizará a continuación la fabricación de un tipo concreto de imán, uno de los denominados imanes de cobalto/tierras-raras, de composición nominal SmCo_5 , (a) mediante el procedimiento convencional (seguida actualmente por la industria) y (b) mediante el método propuesto en esta solicitud de patente.

15

Los polvos de los que se parte, requieren las mismas características por una vía y por otra. Así, los dos primeros pasos son comunes:

- 20 1. Se parte de dos polvos, con tamaño medio de partícula de 6 a 8 μm y distribución granulométrica muy estrecha, y composiciones del 33.8%Sm-66.2%Co en peso (nominalmente, SmCo_5), uno de ellos, y del 60%Sm-40%Co en peso, el otro.
 2. Se toman las cantidades pertinentes de uno y otro polvo de modo que la composición promedio sea del 62.6% Co (en peso). Estos dos polvos son
- 25
- mezclados por agitación, obteniéndose una composición ligeramente más pobre en cobalto que la estequiometría nominal del compuesto SmCo_5 .

Procedimiento convencional

3. La mezcla de polvos es encerrada en una funda de plástico y sometida a
- 30
- alineamiento magnético por acción de un campo magnético del orden de 5 MA/m.
 4. La mezcla de polvos magnéticamente alineados es llevada a una prensa isostática donde es compactada a la presión aproximada de 1400 MPa para obtener una densidad de 6.9 g/cm^3 , que representa aproximadamente un 80% del valor absoluto de la densidad del compuesto.

- 5
5. El compacto en verde obtenido en la etapa anterior es sinterizado en horno, bajo atmósfera de argón purificado, a una temperatura entre 1090 y 1150 °C, durante un tiempo en torno a los 40 minutos. El compacto densifica hasta alcanzar una densidad de 7.7 g/cm³, lo que representa aproximadamente el 90% de la densidad absoluta.
 6. Tras el sinterizado en horno, se somete a la pieza a un tratamiento térmico a 900 °C durante 15 minutos, con objeto de mejorar la fuerza coercitiva.
 7. Los compactos son finalmente magnetizados en un campo de ~5 MA/m.
 8. Eventualmente, el imán es recubierto para reforzar su resistencia a la corrosión.

10

Método objeto de la presente invención

Un esquema del equipo necesario podría ser el indicado en la figura 1:

La matriz 1 es eléctricamente aislante (por ejemplo, fabricada con roca natural, hormigón refractario, tubo cerámico y zuncho de metal, etc.).

15

Los electrodos 2 serán de alguna aleación de cobre con elevada conductividad (por ejemplo, aleación de Cu-Zr). Para conseguir mayor uniformidad en la temperatura interior, puede ser interesante interponer entre el polvo 3 y el electrodo 2 una oblea 4 de material algo menos conductor, por ejemplo, una pseudoaleación (heavy metal) de Cu-W, que además aportará resistencia a la electroerosión.

20

La bobina 5 es la encargada tanto de llevar a cabo el proceso de alineamiento magnético, como el de magnetización final.

La fuente de potencia 6 puede consistir en un transformador de soldadura (en el caso de la S.R.E.), o un banco de condensadores (en el caso de C.D.E.). Otra posibilidad es operar con ambos tipos de fuentes, por ejemplo, en una aplicación secuencial de las mismas: primero descarga por condensadores, y luego intervención del transformador de soldadura.

25

El dispositivo mecánico 7 que ejerza la presión debe ser capaz de suministrar la fuerza necesaria para alcanzar presiones para garantizar el nivel de densificación deseado.

30

3. La mezcla de polvos es introducida en la matriz del equipo de consolidación por S.R.E., y allí mismo es magnéticamente alineada por acción de un campo magnético del orden de 5 MA/m.

35

4. Se inicia el proceso de consolidación eléctrica por S.R.E., al aire, con unos parámetros nominales de 80 MPa de presión, una densidad de corriente de ~6.5

kA/cm², y un tiempo de paso de 70 ciclos, de 0.02 s cada ciclo. La densidad final del compacto resulta ser del 90% o superior.

- 5 5. Concluida la sinterización, y sin retirar el compacto del equipo de S.R.E., se hace pasar una densidad de corriente en torno a 1 - 2 kA/cm², durante tiempos que oscilan entre 400 ciclos (8 segundos). Se consigue con ello efectuar un tratamiento térmico suave. El compacto es enfriado in situ, por efecto de los electrodos que se hallan refrigerados por agua.
6. Terminado el tratamiento térmico, el compacto es magnetizado sin abandonar la matriz por acción de un campo magnético de valor ~5 MA/m.
- 10 7. Eventualmente, el imán es recubierto para reforzar su resistencia a la corrosión.

Las remanencias, coercitividades y productos energía máximos alcanzados por ambas vías son de 1.0 T, 3024 kA/m y 605 kT·A/m, respectivamente. Los datos convencionales han sido tomados de Lenel [F.V. Lenel, "Powder Metallurgy: Principles and Applications", Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1980, p. 531-548].

REIVINDICACIONES

- 5 1. Método para la fabricación pulvimetalúrgica de imanes que comprende como etapa inicial la introducción de un material pulverulento que contiene al menos un elemento magnético seleccionado entre Fe, Co, Ni en una matriz, caracterizado porque una vez introducido el material pulverulento en la matriz se somete secuencialmente y siempre en la misma matriz a:
- alineamiento magnético
 - proceso de consolidación eléctrica.
 - 10 - tratamiento térmico
 - refrigeración y
 - magnetización
- 15 2. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque el material pulverulento contiene adicionalmente al menos un elemento de los denominados tierras raras.
- 20 3. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 2, caracterizado porque antes de la introducción en la matriz, el material pulverulento se mezcla con al menos un segundo material pulverulento de composición diferente y que comprende al menos un primer elemento que se selecciona entre Fe, Co, Ni.
- 25 4. Método según la reivindicación 3, caracterizado porque el segundo material pulverulento comprende al menos un segundo elemento que se selecciona entre los denominados tierras raras.
- 30 5. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque la etapa de alineamiento magnético se realiza exponiendo el material pulverulento a la acción de un campo magnético.
- 35 6. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque el proceso de consolidación eléctrica se realiza mediante la técnica de sinterización por resistencia eléctrica.
7. Método según la reivindicación 6, caracterizado porque el proceso de consolidación eléctrica se realiza mediante la técnica de sinterización por resistencia eléctrica de media frecuencia.

8. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque el proceso de consolidación eléctrica se realiza mediante la técnica de consolidación por descarga eléctrica.
- 5 9. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque el proceso de consolidación eléctrica se realiza mediante la aplicación secuencial de las técnicas de consolidación por descarga eléctrica y sinterización por resistencia eléctrica.
- 10 10. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizado porque el tratamiento térmico del material posterior a la consolidación eléctrica se realiza mediante el paso de corriente eléctrica a través del material.
- 15 11. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizado porque la refrigeración del material tras la etapa de tratamiento térmico se lleva a cabo por contacto con los electrodos enfriados mediante un líquido refrigerante.
- 20 12. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, caracterizado porque la etapa de magnetización del material se efectúa por acción de un campo magnético que permita alcanzar la saturación magnética del material.
13. Método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, caracterizado porque las etapas se realizan en condiciones de atmósfera controlada.
- 25 14. Método según la reivindicación 13, caracterizado porque las etapas se realizan en atmósfera de gas inerte o en vacío.

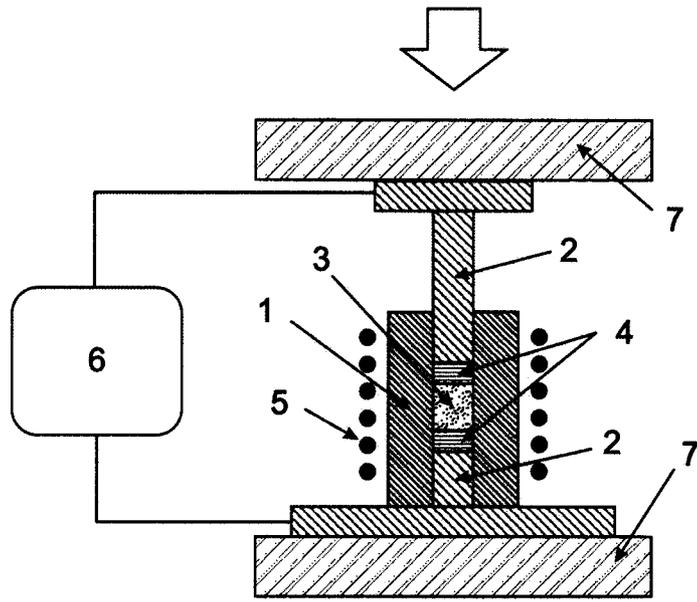


Figura 1