

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 593 305**

51 Int. Cl.:

G01B 7/06 (2006.01)

G01N 27/72 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.08.2013** E 13182047 (4)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.07.2016** EP 2706351

54 Título: **Procedimiento, dispositivo y utilización del dispositivo para determinación cuantitativa no destructiva de espesores de capas de un cuerpo que presenta capas**

30 Prioridad:

07.09.2012 DE 102012017784

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

07.12.2016

73 Titular/es:

**FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR
FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN
FORSCHUNG E.V. (100.0%)
Hansastraße 27c
80686 München, DE**

72 Inventor/es:

**KERN, ROLF;
KOP, HARALD;
CONRAD, CHRISTIAN y
WOLTER, BERND**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 593 305 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

Procedimiento, dispositivo y utilización del dispositivo para determinación cuantitativa no destructiva de espesores de capas de un cuerpo que presenta capas

5 La invención se refiere a un dispositivo y a un procedimiento para la determinación cuantitativa no destructiva de los espesores de capa de un cuerpo de ensayo que presenta al menos dos capas de composición de sustancia diferente a través de análisis de armónicos en la señal de tiempo de la intensidad de campo magnético tangencial y medición de la permeabilidad de superposición en función de la densidad del flujo magnético así como evaluación a través de un evaluador. Por lo demás, la invención se refiere a la utilización del dispositivo según la invención para la determinación de los espesores de capa en un cuerpo de ensayo, que presenta al menos una capa paramagnética y/o una capa diamagnética.

Estado de la técnica

15 Las propiedades de componentes se adaptan con frecuencia a través de capas funcionales y capas de protección a una aplicación dada. Un componente puede presentar desde el principio una estructura de capas o se aplican capas posteriormente. También se pueden modificar la estructura de capas, la composición del material y las dimensiones de las capas a través de procesamiento, por ejemplo tratamiento térmico o procesamiento mecánico. Así, por ejemplo, partiendo de la superficie límite de dos capas aparecen nuevas capas. Además de la composición del material son importantes las dimensiones geométricas, es decir, la secuencia de capas y los espesores de capas.

Puesto que las propiedades de los componentes dependen en parte sensiblemente de la estructura de capas, los procedimientos de ensayo y los medios de ensayo tienen gran importancia para la medición de las capas.

20 Se conocen procedimientos de ensayo para componente metálicos, en los que a través de un esmerilado y dimensionado óptico se investigan componentes mediante verificación al azar metalográfica no destructiva en su estructura de capas. Por su naturaleza, la verificación destructiva no permite verificar un componente propiamente dicho a utilizar posteriormente. En su lugar, se destruye el componente, para deducir características de otro componente.

25 Se conocen también procedimientos de ensayo no destructivos para la determinación de la estructura de capas de un componente. Así, por ejemplo, se pueden verificar componentes de forma no destructiva componentes que contienen capas conductoras a través de medición de la corriente parásita. Otros procedimientos que se basan en ultrasonido, ruidos de Barkhausen magnéticos o acústicos o bien procedimientos de ensayo no destructivos, presentan una serie de ventajas. Así, por ejemplo, es posible la medición de las variables de interés en el propio componente a suministrar. Normalmente, el tiempo de medición es más corto que en un ensayo destructivo. Así, por ejemplo, a través de un procedimiento de ensayo exacto y rápido se pueden regular parámetros de proceso y, por tanto, procesos de fabricación completos en tiempo real.

Sin embargo, en la práctica se conoce sólo pocos procedimientos de ensayo no destructivos, que son equivalentes en la exactitud a un procedimiento de ensayo destructivo.

35 Un subgrupo de procedimientos de ensayo no destructivos para componentes metálicos utiliza las propiedades magnéticas y eléctricas de un componente de ensayo. Así, por ejemplo, se conoce a partir de DE 10 2005 046 574 A1 un aparato de ensayo y un procedimiento de ensayo, que emplean para el ensayo del material un análisis del ruido de Barkhausen, de armónicos, de corriente parásita y/o de la permeabilidad de superposición con frecuencias de magnetización y amplitudes del campo magnético ajustables y a partir de los valores obtenidos se pueden determinar la composición del material, la tensión propia y también defectos del material en componentes en la zona próxima a la superficie. El aparato de ensayo descrito en esta publicación y el procedimiento de ensayo publicado no son adecuados, sin embargo, para la determinación de espesores de capas y se basa solamente en la verificación de una zona próxima a la superficie de un componente. Además, no se pueden medir capas no magnéticas a través de las enseñanzas publicadas.

45 Se conocen a partir de US 7.259.555 B2 un procedimiento y un dispositivo para la determinación de la profundidad de endurecimiento utilizando un sensor de ruido de Barkhausen en un objeto de ensayo. En el objeto de ensayo se trata de un cuerpo de ensayo totalmente ferromagnético y que presenta en este caso al menos dos capas. El procedimiento publicado permite la determinación del espesor de capa de una capa endurecida, pero está limitado al empleo en objetos de ensayo totalmente ferromagnéticos. El ensayo de capas de diferente composición del material no está cubierto por las enseñanzas publicadas.

50 Se conoce a partir de DE 4119903 A1 un procedimiento de medición magnético inductivo para la determinación del espesor de capas finas, según el cual el espesor de capa indicado es casi independiente de la forma del objeto de medición y que se puede emplear para la medición de capas no magnética so no conductoras de electricidad en materiales básicos magnéticos, Pero en el caso de capas finas, la exactitud de medición del procedimiento de

medición publicado es limitada.

5 El documento EP 0 100 009 A1 publica un procedimiento para la determinación del espesor de capa de una capa endurecida a base del análisis del ruido de Barkhausen o de la permeabilidad de superposición. El cuerpo de ensayo está constituido de un único material, la capa superficial está delimitada por un salto de dureza. El principio del procedimiento de medición es la profanidad de penetración dependiente de la frecuencia del campo magnético de una bobina de sensor de corriente parásita. Sin embargo, el procedimiento presupone una conductividad constante sobre todas las capas. En un cuerpo de ensayo con capas de diferente composición del material, esta condición previa no se cumple.

10 El documento WO 87/00293 A1 publica una enseñanza para la determinación de la concentración de volumen de una fase ferrítica de un cuerpo de ensayo que está constituido por una aleación de hierro-carbono. No se publica una enseñanza para la determinación de los espesores de capas en cuerpos de ensayo, cuando las capas presentan una composición diferente del material.

15 El documento DE 44 33 772 A1 publica la utilización de una red neuronal para la evaluación de la señal de medición de un sensor de corriente parásita, de manera que el usuario sin conocimiento de los principios matemáticos puede realizar en la mayor medida posible mediciones independientes del material. Sin embargo, de la publicación no se deduce cómo se pueden medir especialmente espesores de capas finas de diferente composición del material.

20 El documento EP 1 767 932 A1 publica un dispositivo para el análisis de armónicos de la señal de tiempo de la intensidad de campo magnético tangencial y un análisis de permeabilidad de superposición en una estructura. De esta manera pueden detectar composiciones del material, tensiones propias y también defectos del material en componentes en la zona próxima a la superficie, pero no se pueden determinar las propiedades de capas de un cuerpo de ensayo que presenta diferente composición del material.

También la enseñanza de WO 87/05112 A1 permite el análisis de material de un cuerpo de ensayo constituido de material diamagnético, paramagnético, ferromagnético o ferrimagnético, pero no de un cuerpo de ensayo constituido de capas de diferente composición del material.

25 Los procedimientos y dispositivos de ensayo magnéticos no destructivos conocidos a partir del estado de la técnica no son adecuados para determinar espesores de capa en cuerpos de ensayo con alta exactitud en capas finas, cuando las capas presentan una composición diferente del material.

Representación de la invención

30 La invención se basa en el cometido de preparar un procedimiento y un dispositivo que determinan los espesores de capa de un cuerpo de ensayo que presenta al menos dos capas de diferente composición del material con alta exactitud y corta duración de la medición en capas finas. La invención se refiere, además, a la utilización del dispositivo según la invención en un cuerpo de ensayo con al menos una capa paramagnética o diamagnética.

35 El cometido según la invención se soluciona por medio de un procedimiento según la reivindicación 1, un dispositivo según la reivindicación 11 y la utilización del dispositivo según la reivindicación 13. Las características que desarrollan con ventaja la idea de la invención son objeto de las reivindicaciones dependientes así como de la descripción, especialmente con referencia a los ejemplos de realización.

40 El procedimiento según la invención sirve para la determinación de espesores de capa en un cuerpo de ensayo constituido por al menos dos capas con una capa de cubierta exterior y una capa de base dispuesta más profunda en el cuerpo de ensayo con respecto a la capa de cubierta, presentando las capas diferentes propiedades magnéticas y composición del material.

Para la determinación de los espesores de capas se expone el cuerpo de ensayo a un campo alterno magnético y se mide la intensidad del campo magnético en o cerca de la superficie. La medición de la intensidad de campo magnético posibilita la regulación de la intensidad de campo magnético del campo alterno magnético.

45 Se mide al menos una, con preferencia una pluralidad de parejas de valores del contenido de armónicos de la señal de tiempo de la intensidad de campo magnético tangencial en función de la intensidad de campo magnético. Una pareja de valores se compone del valor de medición del contenido de armónicos de la señal de tiempo y del valor de medición de la intensidad de campo magnético.

50 Se mide al menos una, con preferencia una pluralidad de parejas de valores de la permeabilidad de superposición en función de la intensidad de campo magnético. Una pareja de valores se compone del valor de medición de la permeabilidad de superposición y del valor de medición de la intensidad de campo magnético.

A partir de las parejas de valores medidos se determina por medio de un procedimiento de análisis estadístico el espesor de capa de la capa de cubierta y/o de otras capas en el cuerpo de ensayo.

El campo alterno magnético puede contener para la medición de las parejas de valores del contenido de armónicos de la señal de tiempo y de la permeabilidad de superposición varios componentes de frecuencias. En particular, un componente casi estadístico con una amplitud grande y un componente de frecuencia elevada con amplitud reducida.

5 A través de la utilización de un procedimiento de análisis estadístico sobre los valores de medición del contenido de armónicos de la señal de tiempo de la intensidad de campo magnético tangencial en función de la intensidad de campo magnético y los valores de medición de la permeabilidad de superposición en función de la intensidad de campo magnético se pueden determinar los espesores de capa con alta determinación y reducida desviación estándar. El procedimiento de análisis estadístico se puede adaptar rápidamente a condiciones de medición
10 modificadas y cuerpos de ensayo. El procedimiento de análisis estadístico es un modelo, con el que se reproducen los valores de medición y/o variables derivadas de ellos como variables de entrada sobre variables de destino, los espesores de capa a medir.

Con ventaja, el procedimiento de análisis estadístico se calibra en un llamado cuerpo de calibración, en el que el cuerpo de calibración presenta una secuencia de capas conocida y espesores de capas conocidos. Calibrar significa
15 que los parámetros del procedimiento de análisis estadístico se ajustan a los parámetros del modelo para reducir al mínimo el error de la determinación de espesores de capa en la zona de medición predeterminada. Para el ajuste se pueden aplicar diversos métodos, como por ejemplo el método de los cuadrados mínimos, en el que los parámetros del modelo se ajustan de tal manera que la suma de los cuadrados de las desviaciones entre valor de salida del modelo y el espesor de capa conocido respectivo es mínima.

20 Con preferencia, el procedimiento de análisis estadístico se calibra en varios cuerpos de calibración, que presentan secuencias de capas y/o espesores de capas diferentes, pero conocidas.

Entre otras cosas, para la mejora de la exactitud se pueden incluir adicionalmente valores conocidos de coeficientes del material como dureza, límite elástico, resistencia a la tracción, dilatación a rotura y/o dilatación uniforme en el procedimiento de análisis estadístico.

25 Para la mejora de la exactitud se pueden incluir también valores de medición del ruido de Barkhausen magnético y/o acústico en función de la intensidad de campo magnético en el procedimiento de análisis estadístico.

Los valores de medición, parejas de valores a partir de una medición del contenido de armónicos de la señal de tiempo de la intensidad de campo magnético tangencial y de la medición de la permeabilidad de superposición, respectivamente, en función de la intensidad de campo magnético forman secuencias de parejas de valores, que
30 permiten la determinación de variables características como valores extremos locales y globales, simetrías, anchuras medias. Otras variables características se conocen a partir del campo de la discusión de las curvas. Las variables características se designan, por lo demás, también variables características funcionales.

Especialmente ventajosa es la determinación del máximo de la amplitud y/o de la anchura media especialmente a 25% o 50% o 75% del máximo de la amplitud de las secuencias de parejas de valores de la permeabilidad de
35 superposición y de las variables características del contenido de armónicos de la señal de tiempo de la intensidad de campo magnético tangencial y en función de la intensidad de campo magnético. Estas variables características sirven entonces como variables de entrada para el procedimiento de análisis estadístico.

A través de la reducción de las secuencias de parejas de valores a variables características escalares se puede aplicar un procedimiento de análisis estadístico sencillo.

40 En este caso se puede tratar de un análisis de regresión, en particular un análisis de regresión lineal.

En particular, en el caso de variables de entrada más complejas para el procedimiento de análisis estadístico, el procedimiento de análisis puede partir con ventaja del campo del reconocimiento de patrones.

La determinación de los espesores de capa se puede aplicar sobre cuerpos de ensayo con diferente secuencia de capas y diferentes propiedades electromagnéticas de las capas. De esta manera, una de las capas, especialmente
45 la capa de cubierta puede ser paramagnética o diamagnética. Al menos una de las capas interiores, en particular la capa de base es con preferencia ferromagnética.

Con ventaja, el procedimiento según la invención para la determinación del espesor de capa se puede aplicar sobre una capa de difusión, que ha aparecido en la superficie límite de dos capas de diferente composición del material. La capa de difusión crece en este caso, por ejemplo a través de altas temperaturas a costa de los espesores de capa
50 de las capas vecinas.

Con ventaja, se emplea el procedimiento según la invención para la determinación del espesor de capa de una capa de difusión, que está constituida por una mezcla de los átomos de una capa ferromagnética adyacente y de una capa paramagnética o diamagnética adyacente.

Especialmente la capa paramagnética o diamagnética puede contener aluminio y silicio, la capa ferromagnética puede contener aluminio y hierro o hierro, manganeso y/o carbono o nitrógeno o puede estar constituida de acero.

5 El dispositivo según la invención para la determinación de los espesores de capa de un cuerpo de ensayo que está constituido de al menos dos capas de diferente composición del material presenta un sensor y una electrónica de sensor. El sensor contiene al menos un electroimán, un sensor de campo magnético y una bobina de detección. El sensor y la electrónica de sensor están diseñados para impulsar el cuerpo de ensayo con un campo alterno magnético y para registrar un contenido de armónicos de la señal de tiempo de la intensidad de campo tangencial, una permeabilidad de superposición y una intensidad de campo magnético en o en la proximidad de la superficie del cuerpo de ensayo.

10 La electrónica de sensor presenta un evaluador, que está diseñado para calcular los espesores de capa del cuerpo de ensayo a partir del contenido de armónicos, de la señal de tiempo de la intensidad de campo magnético tangencial y de la permeabilidad de superposición en función de la intensidad de campo magnético a través de un procedimiento de análisis estadístico.

15 Según la invención se reconoce y se puede emplear a través del procedimiento según la invención, el dispositivo según la invención así como la utilización del dispositivo que se pueden distinguir una capa de difusión ferromagnética y otras capas ferromagnéticas en sus aportaciones a los valores de medición entre sí. Incluso las capas paramagnéticas o diamagnéticas se pueden medir, por ejemplo, a través de su aportación a la retirada del sensor 5.

20 Según la invención, el dispositivo publicado anteriormente se utiliza para la determinación de los espesores de capa de un cuerpo de ensayo.

Al menos una de las capas del cuerpo de ensayo, especialmente la capa de cubierta puede ser paramagnética o diamagnética.

25 Con ventaja, el dispositivo publicado anteriormente se puede utilizar para la determinación de espesores de capa en un cuerpo de ensayo, en el que una de las capas interiores es ferromagnética, especialmente en un cuerpo de ensayo que presenta una capa de difusión ferromagnética.

La invención se describe a continuación sin limitación de la idea general de la invención con la ayuda de ejemplos de realización con referencia a las figuras.

30 La figura 1 muestra una disposición según la invención que presenta un cuerpo de ensayo 4 y un dispositivo de medición. El dispositivo de medición está constituido por un sensor 5 y una electrónica de sensor 6, que están conectados a través de un canal de medición de control L. El cuerpo de ensayo 4 presenta tres capas 1, 3 y 2 con diferentes propiedades electromagnéticas. El sensor 5 está dispuesto sobre o cerca de la superficie del cuerpo de ensayo y está conectado con la electrónica de sensor 6. La electrónica de sensor 6 contiene al menos un control 7 y un evaluador 8, que genera varios resultados de estimación S_{dx1} , S_{dx2} y S_{dxn} a partir de las variables características funcionales M_1 , M_2 a M_i .

35 La figura 2 muestra el cuerpo de ensayo 4 con el espesor de capa de la capa de cubierta S_{d1} , el espesor de capa de la capa de difusión S_{d3} , el espesor de capa de la capa de base S_{d2} y el espesor total del cuerpo de ensayo S_{d4} .

40 La figura 3 muestra para la representación de una dependencia de la variable $f(x)$ de x una secuencia de parejas de valores de medición ($f(x)$, x). Por lo demás, se representa la determinación gráfica del máximo de la amplitud, es decir, la determinación de la variable característica funcional M_4 . En las variables características funcionales M_1 , M_2 y M_3 se trata, respectivamente, de la anchura media a 75%, 50% y 25% del máximo de la amplitud M_4 .

La figura 4, la imagen izquierda muestra una secuencia típica de valores de medición de la permeabilidad de superposición en función de la intensidad de campo magnético para un cuerpo de ensayo con una secuencia de capas de acuerdo con la imagen derecha.

45 La figura 5, la imagen izquierda muestra una secuencia típica de valores de medición de la permeabilidad de superposición en función de la intensidad de campo magnético para un cuerpo de ensayo con una secuencia de capas según la imagen derecha.

La figura 6, la imagen izquierda muestra una secuencia típica de valores de medición de la permeabilidad de superposición en función de la intensidad de campo magnético para un cuerpo de ensayo con una secuencia de capas según la imagen derecha.

50 La representación según la figura 1 es esquemática muy simplificada.

Se representa un cuerpo de ensayo 4, que presenta una estructura de capas. Los espesores de capa son desconocidos y se determinan con la ayuda del sensor 5 y de la electrónica de sensor 6. Las capas se diferencian

entre sí en sus propiedades electromagnéticas o magnéticas. De esta manera, las capas pueden ser para-, dia-, ferro- o antiferromagnéticas. Por ejemplo, la capa de cubierta exterior 1 es paramagnética o diamagnética y la capa de base 2 es ferromagnética. Como capa de base se designa la capa más alejada del sensor, que proporciona una aportación a la señal de medición. La capa 3 es una capa de difusión, que contiene tanto átomos de la capa 1 como también átomos de la capa 2. Tal capa de difusión aparece, por ejemplo, durante el procesamiento de un cuerpo constituido al principio sólo por las capas 1 y 2 a través de actuación de alta temperatura durante un periodo de tiempo prolongado. La capa 1 es la capa más próxima al sensor y puede contener, por ejemplo, átomos de aluminio, silicio, cromo y/o nitrógeno o también polímeros orgánicos, por ejemplo lacas. La capa 2 puede contener, por ejemplo, átomos de hierro, manganeso, cobalto o puede estar constituida por ellos. A través del procesamiento resulta la capa de difusión 3, que presenta una mezcla de los átomos de las capas vecinas y de esta manera se diferencia en sus propiedades electromagnéticas de las capas adyacentes.

Un sensor 5 está dispuesto cerca o sobre la superficie del cuerpo de ensayo 4 y de la capa 1. La distancia con respecto a la superficie o bien es cero, conocida, se mide o, en el caso de una medición repetida, se mantiene constante. El sensor 5 genera a través de un electroimán constituido por al menos una bobina un campo magnético en el cuerpo de ensayo 4, que se mide a través de un sensor de campo magnético, que es parte del sensor 5. La electrónica del sensor 6 está diseñada para activar a través del control 7 el electroimán, de tal manera que el campo magnético medido a través del sensor de campo magnético coincide con un valor de previsión. El valor de la intensidad del campo magnético y su función de tiempo se pueden adaptar de esta manera a través del control 7 discrecionalmente a la tarea de medición. De la misma manera parte del sensor 5 es una bobina de detección para la medición de los campos magnéticos generador a través del cuerpo de ensayo 4. El sensor 5 y el control 7 están diseñados de tal forma que son posibles al menos un análisis de armónicos y la medición de la permeabilidad de superposición.

En el análisis de armónicos se genera a través del electroimán del sensor 5 un campo alterno magnético sinusoidal. Una sonda de campo magnético, por ejemplo una sonda Hall, registra el desarrollo de tiempo de la intensidad de campo magnético tangencial. El desarrollo de tiempo de la intensidad de campo tangencial se distorsiona en presencia de materiales ferromagnéticos a través de la no linealidad de la histéresis ferromagnética, se producen desviaciones de la forma de la curva respecto al desarrollo sinusoidal. Especialmente en la proximidad de los pasos de anulación se muestran distorsiones claras. La histéresis ferromagnética provoca en la señal de la intensidad de campo tangencial, además de la oscilación básica, porciones armónicas características (oscilaciones armónicas), que son provocadas por la resistencia magnética no lineal del objeto de medición. Con la ayuda de un análisis Fast Fourier se pueden determinar digitalmente las porciones básicas y armónicas. El software de evaluación del sistema de medición describe estas porciones armónicas a través de variables características M, por ejemplo en forma de un filtro de distorsión no lineal.

La interacción del campo con las capas del cuerpo de ensayo 4 se reproduce en la señal de tiempo distorsionada del campo y, por lo tanto, en las porciones armónicas.

Para la medición de la permeabilidad de superposición, se genera a través del electroimán del sensor 5 un campo magnético en el cuerpo de ensayo 4, que corresponde a una combinación de un campo de excitación magnético sinusoidal y un campo alterno de alta frecuencia superpuesto. Durante el recorrido lento, casi estático, provocado por el campo de excitación del bucle de histéresis magnética aparecen bucles internos pequeños a través del campo alterno. A través de la electrónica del sensor se determina la permeabilidad de superposición a partir del incremento de los bucles internos en función de la intensidad de campo magnético del campo de excitación.

Con preferencia, la frecuencia del campo de excitación casi estático variable periódicamente está en un intervalo entre 50 Hz y 500 Hz. La frecuencia del campo alterno es mayor que 10 kHz, con preferencia aproximadamente 100 kHz.

Con ventaja, el sensor 5 y la electrónica de sensor 6 están diseñados para realizar otras mediciones, por ejemplo la medición del ruido de Barkhausen magnético y/o acústico en función de la intensidad de campo magnético. Mediciones adicionales pueden reducir la inseguridad estadística en la determinación de los espesores de capa del cuerpo de ensayo 4.

Las parejas de valores medidas en el marco del análisis de armónicos y la medición de la permeabilidad de superposición, pero también las parejas de valores generadas en el marco de otras mediciones, se componen del valor de medición respectivo y del valor de la intensidad de campo magnético. A través de una pluralidad de parejas de valores, la secuencia de valores resultantes se aproxima a una función constante, con lo que se pueden determinar con exactitud variables características funcionales escalares típicas M_1, M_2 a M_i . Con ventaja, para al menos una secuencia de valores se determina una o varias variables características funcionales M_1, M_2 a M_i , por ejemplo máximos y/o mínimos locales, globales o puntos de inversión o anchuras medias, especialmente a 75%, 50% y/o 25% del máximo de amplitud local respectivo y se conduce al evaluador 8.

Además de las mediciones mencionadas anteriormente de varias parejas de valores, la medición puede estar

limitada también con respecto a al menos una propiedad del material a un valor de medición con una intensidad de campo magnético fija seleccionada, de manera que este valor de medición propiamente dicho se puede preparar como una variable de entrada en el evaluador 8. Por ejemplo, esto equivale a una medición del máximo local, cuando se conoce la curva de la función y se coloca la intensidad de campo magnético para la medición individual en la posición del máximo local estimado. Normalmente, se miden, si embargo, al menos diez, al menos cien o al menos mil, con preferencia un número muy alto de parejas de valores, de manera que se pueden determinar las variables características funcionales M_1, M_2 a M_i con gran exactitud. La determinación se realiza en el control 7 por ejemplo con la ayuda de un ordenador, procesador, microcontrolador y programa correspondiente o un FPGA o un ASIC. Tanto el control 7 como también el evaluador 8 pueden estar implementados en software, que se procesa en un ordenador.

Las variables características funcionales M_1, M_2 a M_i preparadas por el control 7 son alimentadas al evaluador 8, que reproduce con la ayuda de un procedimiento de análisis estadístico, es decir, con un modelo adaptado a la tarea de medición las variables características funcionales M_1, M_2 a M_i sobre las variables de salida S_{dx1}, S_{dx2} a S_{dxn} . Las variables de salida S_{dx1}, S_{dx2} a S_{dxn} individuales corresponden en el marco de la exactitud de medición de la estructura general a los espesores de capa S_{d1}, S_{d2} a S_{dn} respectivos del cuerpo de ensayo 4. A través de la adaptación o ajuste adecuados del modelo se pueden calcular todos los espesores de capa individuales y el espesor de capa total.

Con preferencia, el evaluador 8 reproduce las variables de entrada M_1, M_2 a M_i través de un procedimiento de regresión sobre las variables de salida S_{dx1}, S_{dx2} a S_{dxn} . Con ventaja, se aplica una regresión lineal, que aproxima con una función lineal una cantidad de n puntos de datos óptimamente en el sentido de la suma mínima de los cuadrados de errores. El modelo describe el valor de medición del espesor de capa S_{dxn} como polígono de grado i .

$$S_{dxn} = a_{0n} + a_{1n} \cdot M_1 + a_{2n} \cdot M_2 + a_{3n} \cdot M_3 + \dots + a_{in} \cdot M_i$$

con coeficientes de regresión a_{0n}, a_{1n} hasta a_{in} y variables características funcionales M_1, M_2 a M_i .

El modelo se adapta a través de los coeficientes de regresión a la tarea de medición, es decir, el cuerpo de ensayo. A tal fin, se miden las variables de entrada M_1, M_2 a M_i en al menos uno, con preferencia varios cuerpos de ensayo con secuencia de capas y espesores de capa S_{d1}, S_{d2} , etc. conocidos. Puesto que se conoce la estructura de capas, se conocen también las variables de salida S_{dx1}, S_{dx2} a S_{dxn} , que corresponderían en caso de error de medición cero a los espesores de capa S_{d1}, S_{d2} a S_{dn} . A través de las variables de entrada y de salida conocidas se puede adaptar el modelo con el objetivo de un error reducido a la tarea de medición, es decir, calibrarlo. Un cuerpo de ensayo con estructura de capas conocido o al menos con un espesor de capa conocido, que sirve para la adaptación del modelo, se llama cuerpo de calibración.

Un espesor de capa de una capa no magnética o capas no magnéticas entra indirectamente en la medición de las propiedades magnéticas, puesto que a través de las capas no magnéticas se incrementa la distancia de una capa magnética colocada profunda desde el sensor. De esta manera, a través de la estructura según la invención también son accesibles las capas magnéticas a la medición de espesores de capas magnéticas. Cada una de las capas del cuerpo de ensayo, ya sean magnéticas o no, proporciona una aportación a las señales de medición, cuando la capa de base es magnética.

El cuerpo de ensayo 4 puede comprender, entre otros, los siguientes sistemas de capa para capa 1 // capa 2:

- aluminio, silicio // acero
- aluminio, silicio / capa de difusión / acero Control
- polímero orgánico // acero

La capa de base puede ser tan gruesa que no caiga totalmente en la zona de detección del procedimiento y/o dispositivo según la invención. Entonces no se puede determinar el espesor de capa de la capa de base y el espesor de capa total sobre la base del procedimiento y del dispositivo según la invención. Los espesores de capa de las capas interiores en la zona de detección se pueden determinar, sin embargo, posteriormente.

Lista de signos de referencia

- 1 Capa de cubierta
- 2 Capa de base
- 3 Capa interior
- 4 Cuerpo de ensayo
- 5 Sensor
- 6 Electrónica de sensor
- 7 Control
- 8 Evaluador

REIVINDICACIONES

- 5 1.- Procedimiento para la determinación de espesores de capas en un cuerpo de ensayo (4) constituido por al menos dos capas, con una capa de cubierta exterior (1) y una capa de base (2) dispuesta más profunda en el cuerpo de ensayo con respecto a la capa de cubierta, en el que la capa de cubierta y la capa de base presentan diferentes propiedades magnéticas y composición del material con las siguientes etapas:
- generación de un campo alterno magnético en el cuerpo de ensayo;
 - medición de la intensidad de campo magnético en o cerca de la superficie del cuerpo de ensayo;
 - medición de al menos una, con preferencia una pluralidad de parejas de valores del contenido de armónicos de la señal de tiempo de la intensidad de campo magnético tangencial en función de la intensidad de campo magnético;
 - medición de al menos una, con preferencia de una pluralidad de parejas de valores de la permeabilidad de superposición en función de la intensidad de campo magnético y
 - determinación del espesor de capa de la capa de cubierta (1) y/o de una o varias otras capas dispuestas en el cuerpo de ensayo a través de un procedimiento de análisis estadístico, con las parejas de valores medidos del contenido de armónicos de la señal de tiempo de la intensidad de campo magnético tangencial y de la permeabilidad de superposición o valores extremos locales y/o globales y/o simetrías y/o puntos de inversión y/o anchuras medias y/o factores de distorsión no lineal determinados a partir de las parejas de valores como variables de entrada.
- 10
- 15
- 20 2.- Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado por que el procedimiento de análisis estadístico se calibra a través de medición de parejas de valores según la reivindicación 1 en un cuerpo de calibración.
- 3.- Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 ó 2, caracterizado por que en el procedimiento de análisis estadístico se incluyen los valores característicos del material dureza, límite elástico, resistencia a tracción, dilatación a rotura y/o dilatación uniforme.
- 25 4.- Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado por que se miden al menos dos, con preferencia una pluralidad de parejas de valores del ruido de Barkhausen magnético y/o acústico en función de la intensidad de campo magnético y se incluyen los valores de medición o valores extremos locales y/o globales y/o simetrías y/o puntos de inversión y/o anchuras medias y/o factores de distorsión no lineal determinados a partir de ellas como variables de entrada en el procedimiento de análisis estadístico.
- 30 5.- Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado por que a partir de las parejas de valores medidos se determina un máximo de amplitud y/o una anchura media especialmente a 25% o 50% o 75% del máximo de amplitud y se incluyen como variables de entrada en el procedimiento de análisis estadístico.
- 35 6.- Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado por que el procedimiento de análisis estadístico es un análisis de regresión.
- 7.- Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizado por que el procedimiento de análisis estadístico es un procedimiento de reconocimiento de modelos.
- 8.- Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado por que al menos una de las capas del cuerpo de ensayo (4), especialmente la capa de cubierta (1) es paramagnética o diamagnética.
- 9.- Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado por que al menos una de las capas interiores del cuerpo de ensayo (4) o la capa de base (2) es ferromagnética.
- 40 10.- Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizado por que al menos una de las capas del cuerpo de ensayo (4) es una capa de difusión (3), que contiene una mezcla de átomos de las capas adyacentes, especialmente de la capa de cubierta (1) o está constituida por ella.
- 45 11.- Dispositivo para la determinación de los espesores de capa de un cuerpo de ensayo (4) que presenta al menos dos capas de diferente composición del material, con un sensor (5) y con una electrónica de sensor (6), en el que el sensor (5) presenta un electroimán, un sensor de campo magnético y una bobina de detección y el sensor (5) y la electrónica de sensor (6) están instalados para impulsar el cuerpo de ensayo (4) con un campo alterno magnético y para registrar un contenido de armónicos de la señal de tiempo de la intensidad de campo tangencial, una permeabilidad de superposición y una intensidad de campo magnético en o en la proximidad de la superficie del cuerpo de ensayo, caracterizado por que la electrónica de sensor (6) está equipada con un evaluador (8), que está
 - instalado para determinar al menos uno de los espesores de capa (S_{d1} , S_{d2} , $S_{d3,\dots}$, S_{dn}) del cuerpo de ensayo (4) a partir del contenido de armónicos de la señal de tiempo de la intensidad de campo magnético tangencial y de la
- 50

permeabilidad de superposición en función de la intensidad de campo magnético así como de valores extremos locales y/o globales y/o simetrías y/o puntos de inversión y/o anchuras medias y/o factores de distorsión no lineal determinados a partir de ellas por medio del procedimiento de análisis estadístico.

5 12.- Dispositivo según la reivindicación 11, caracterizado por que la unidad de procesamiento de señales (6) está diseñada para ajustar parámetros del evaluador (8) a través de valores de medición del contenido de armónicos de la señal de tiempo de la intensidad de campo magnético tangencial y de la permeabilidad de superposición en función de la intensidad de campo magnético en un cuerpo de calibración.

10 13.- Utilización del dispositivo según una de las reivindicaciones 11 a 12 para la determinación de al menos uno de los espesores de capa (S_{d1} , S_{d2} , $S_{d3, \dots}$, S_{dn}) del cuerpo de ensayo (4), de manera que al menos una de las capas (1), (2), (3) del cuerpo de ensayo (4), especialmente la capa de cubierta (1) es paramagnética o diamagnética.

14.- Utilización según la reivindicación 13, caracterizada por que al menos una de las capas interiores, especialmente la capa de difusión (3) y/o la capa de base (2) del cuerpo de ensayo (4) es ferromagnética.

15

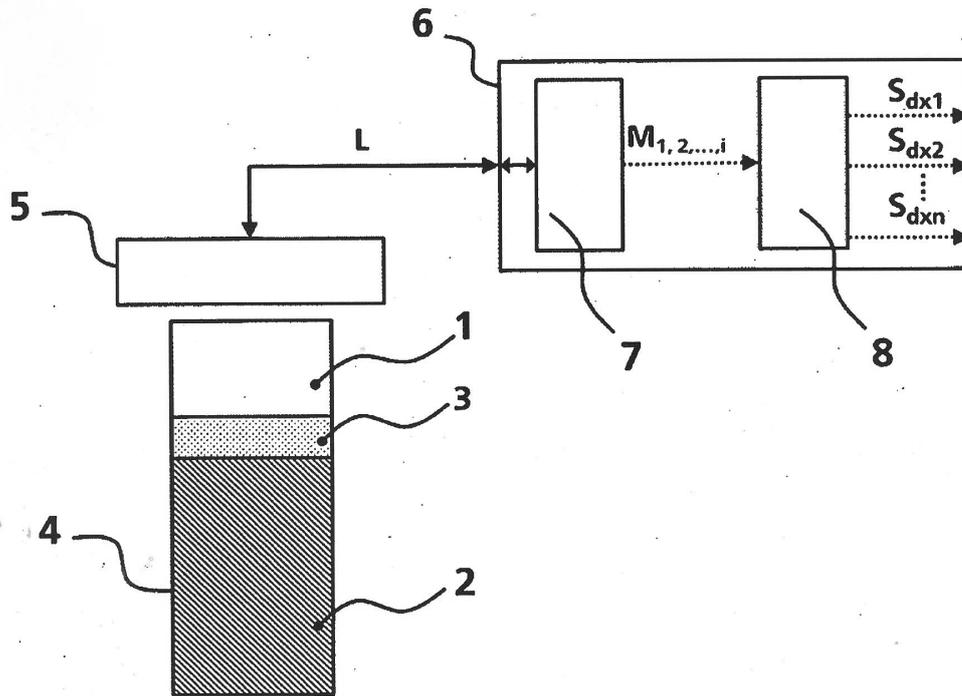


Figura 1

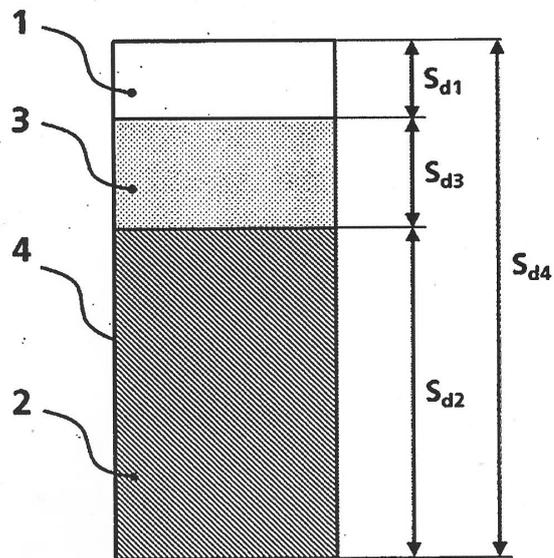


Figura 2

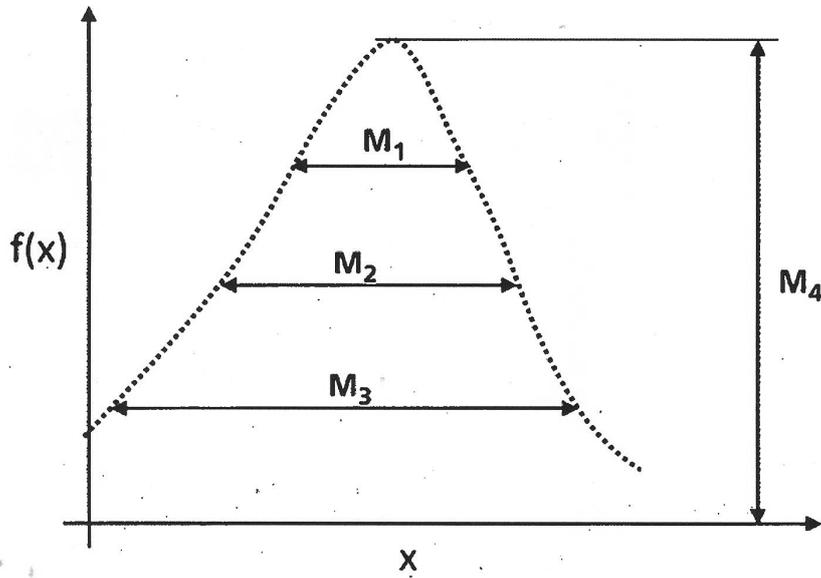


Figura 3

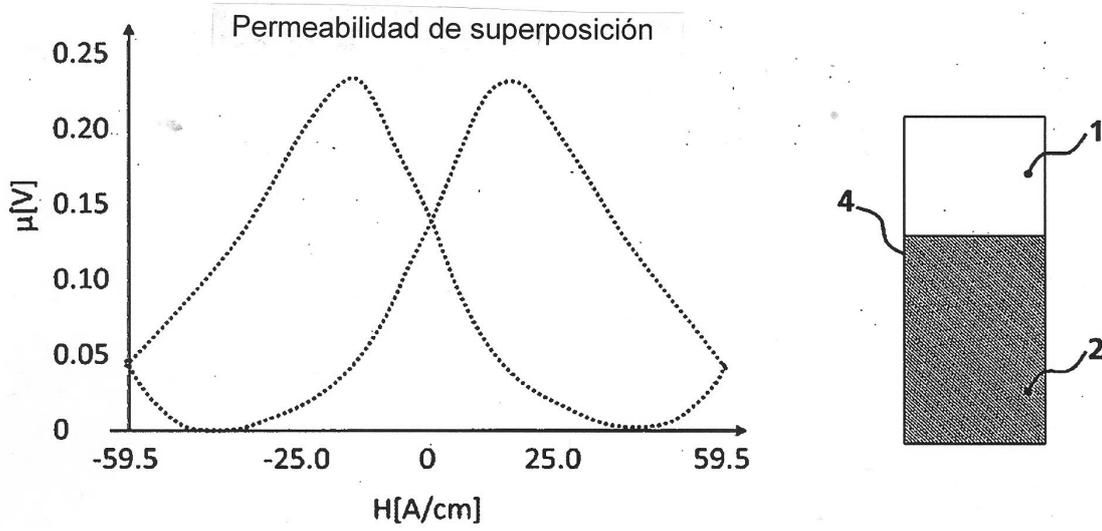


Figura 4

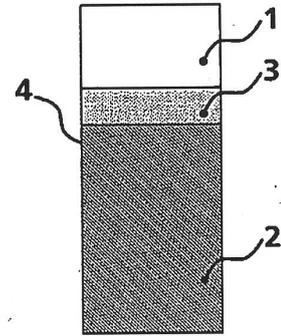
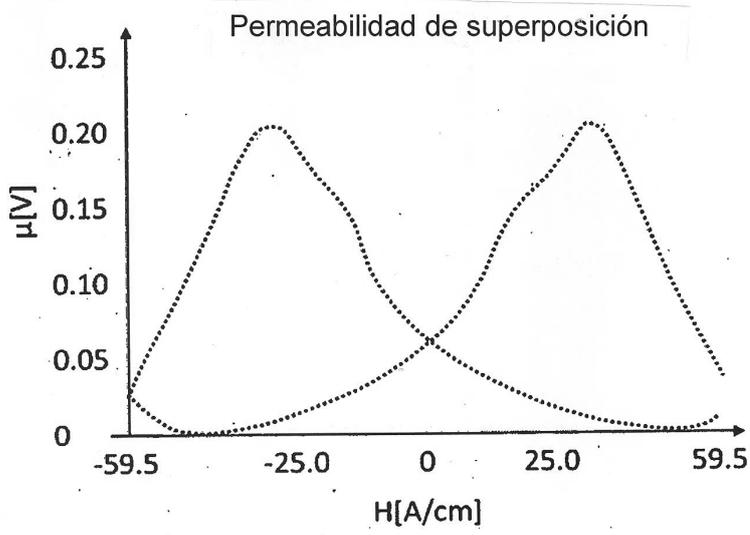


Figura 5

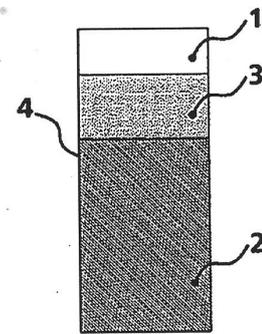
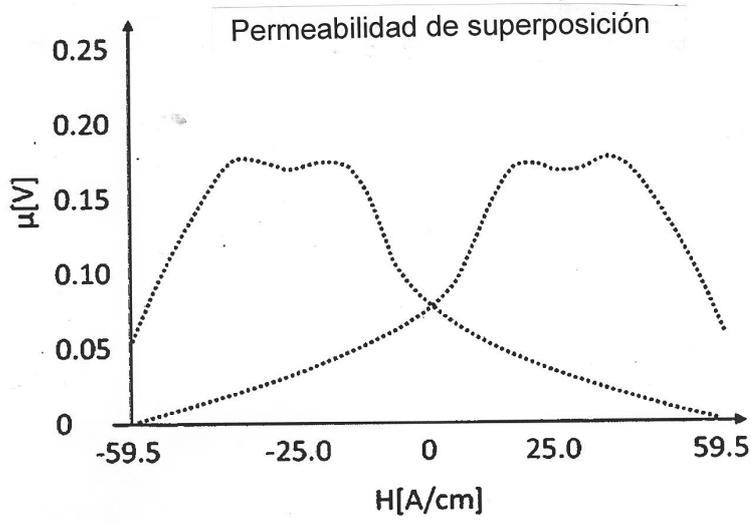


Figura 6