



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 301 211**

51 Int. Cl.:
G05D 17/00 (2006.01)
G01L 3/10 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Número de solicitud europea: **98950604 .3**
86 Fecha de presentación : **21.10.1998**
87 Número de publicación de la solicitud: **0953169**
87 Fecha de publicación de la solicitud: **03.11.1999**

54 Título: **Transductor de par sin aro imanado circularmente y procedimiento para medir el par usando el mismo.**

30 Prioridad: **21.10.1997 US 64831**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
16.06.2008

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
16.06.2008

73 Titular/es: **Magna-Lastic Devices, Inc.**
111 West Buchanan Street
Carthage, Illinois 62321-0130, US

72 Inventor/es: **Garshelis, Ivan, J.**

74 Agente: **Gil Vega, Víctor**

ES 2 301 211 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).

ES 2 301 211 T3

DESCRIPCIÓN

Transductor de par sin aro imanado circularmente y procedimiento para medir el par usando el mismo.

5 Referencias de solicitudes relacionadas

Esta solicitud reivindica la prioridad de la solicitud provisional U.S. 60/064.831, presentada el 21 de octubre de 1997.

10 Campo y antecedentes de la invención

La presente invención se refiere a sensores de par y más en concreto a sensores de par magnetoelásticos sin contacto para proporcionar una medida del par aplicado en un árbol.

15 En el control de sistemas con árboles motores giratorios, el par y la velocidad son los parámetros fundamentales que nos interesan. Por tanto, la detección y medición del par de un modo económico, fiable y exacto ha sido un objetivo principal para los trabajadores durante varias décadas.

20 Anteriormente, la medición de par se realizaba usando sensores de tipo contacto unidos directamente al árbol. Uno de tales sensores es un aparato de detección de par de tipo "indicador de tensión", en el que uno o más indicadores de tensión están directamente unidos a la superficie periférica externa del árbol y un circuito en puente u otro medio bien conocido mide un cambio de resistencia producido por la tensión. Sin embargo, los sensores de tipo contacto son relativamente inestables y su fiabilidad es limitada debido al contacto directo con el árbol giratorio. Además, resultan muy caros y por tanto no son prácticos desde el punto de vista comercial y su uso no es competitivo en muchas 25 aplicaciones tales como en sistemas de dirección automotrices, para los que ahora se buscan sensores de par.

Después, se desarrollaron sensores de par sin contacto de tipo magnetoestrictivo para usar con árboles giratorios. Por ejemplo, la patente U.S. 4.896.544 de Garshelis describe un sensor que comprende un elemento que incluye un par, con una superficie ferromagnética y magnetoestrictiva adecuada, dos bandas circunferenciales diferentes dentro 30 del elemento dotadas respectivamente de anisotropía magnética simétrica inducida mediante tensión residual dirigida helicoidamente y un dispositivo discriminador magnético para detectar, sin ponerse en contacto con el elemento sometido a un par, diferencias en la respuesta de dos bandas a fin de igualar fuerzas imanantes axiales. Es más normal que la imanación y la detección se realicen proporcionando un par de bobinas de imanación o excitación que recubran y rodeen las bandas, con las bobinas conectadas en serie y accionadas mediante una corriente alterna. El par se detecta 35 usando dos bobinas detectoras conectadas de manera opuesta para medir una señal de diferencias que resulta de los flujos de dos bandas. Lamentablemente, proporcionar suficiente espacio para la excitación requerida y las bobinas detectoras en y alrededor del dispositivo en el que se usa el sensor, ha creado problemas prácticos en aplicaciones donde el espacio no sobra. Además, tales sensores son caros, lo que resulta poco práctico para usar en dispositivos competitivos de alto coste, por ejemplo en aplicaciones automotrices.

40 Últimamente, se han desarrollado transductores de par basados en medir el campo que proviene de la inclinación inducida por el par de imanaciones remanentes inicialmente circunferenciales. Estos transductores utilizan preferiblemente un anillo de paredes delgadas ("aro") que sirve de elemento generador de campo. Ver por ejemplo, las patentes U.S. 5.351.555, 5.465.627 y 5.520.059 de Garshelis. La tensión "circunferencial" de tracción en el anillo, asociada con el medio de su unión al árbol que incluye el par que se mide, establece una anisotropía uniaxial dominante circunferencialmente dirigida. Al aplicar esfuerzo torsional en el árbol, la imanación se reorienta y se hace más helicoidal a medida que aumenta el esfuerzo torsional. La imanación helicoidal que resulta de la torsión tiene un componente 45 circunferencial y un componente axial, dependiendo de la magnitud del componente axial enteramente de la torsión. Uno o más sensores vectoriales de campo magnético detectan la magnitud y polaridad del campo que se produce, como resultado del par aplicado, en el espacio que rodea el transductor.

Otro propósito más de la invención es proporcionar un procedimiento para hacer un transductor de par magnetoelástico que incluya un árbol unitario con una composición química normalmente homogénea de principio a fin, que comprenda zonas activas y pasivas separadas con propiedades magnéticas adecuadas para su función correspondiente 55 sometiendo las zonas adecuadas del árbol a procesos de transformación de fase térmica, a procesos de transformación de fase mecánica o a combinaciones de procesos de transformación de fase térmica y mecánica para obtener la fase metalúrgica deseada correspondiente en cada una de tales zonas para dotar cada una de tales zonas de propiedades magnéticas adecuadas para su función correspondiente.

60 Estos y otros propósitos se consiguen proporcionando un sensor de par como el que se describe en la reivindicación 1, un procedimiento para detectar un par como el que se describe en la reivindicación 12 y un procedimiento para producir un transductor de par magnetoelástico como el que se describe en la reivindicación 17.

65 El sensor de par comprende una zona con actividad magnetoelástica en un árbol sometido a un par, y un sensor de campo magnético tal como un sensor de efecto Hall, responsable del campo de la zona transductora que se produce como resultado de la aplicación de par en la zona con actividad magnetoelástica. En la realización preferida, la zona con actividad magnetoelástica se polariza en una única dirección circunferencial y posee una anisotropía magnética

ES 2 301 211 T3

suficiente para devolver la imanación a la zona, después de la aplicación del par en el elemento, en una única dirección circunferencial cuando el par aplicado se reduce a cero, estando el árbol sometido a un par formado por un material policristalino en donde al menos un 50% de la distribución de imanaciones locales está situada dentro de un cuadrante de 90° dispuesto simétricamente alrededor de la dirección de polarización magnética y teniendo una coercitividad
5 suficientemente alta para que el campo de la zona transductora no cree campos magnéticos parasitarios en zonas próximas al árbol con una intensidad suficientemente grande como para destruir la utilidad, con fines de detección del par, del campo magnético puro visto por el sensor de campo magnético. En realizaciones particularmente preferidas, el árbol está formado por un material policristalino orientado de manera aleatoria que tiene simetría cúbica y la coercitividad es superior a 15, de preferencia superior a 20 y, más preferiblemente, superior a 35.

10 En otra realización de la invención, estos y otros propósitos se consiguen proporcionando un sensor de par que incluya un árbol unitario con una composición química normalmente homogénea de principio a fin que comprenda zonas activas y pasivas separadas con propiedades magnéticas adecuadas para su función correspondiente. Tal sensor de par se hace sometiendo las zonas adecuadas del árbol a procesos de transformación de fase térmica, a procesos de
15 transformación de fase mecánica o a combinaciones de procesos de transformación de fase térmica y mecánica para obtener la fase metalúrgica deseada correspondiente en cada una de tales zonas para dotar cada una de tales zonas de propiedades magnéticas adecuadas para su función correspondiente.

Breve descripción de los dibujos

20 La figura 1(a) es un dibujo de conjunto que muestra el sensor de par de la presente invención que incluye una zona activa ABC con zonas circunferenciales magnéticamente contiguas y de polarización contraria formadas en un árbol sólido.

25 La figura 1(b) muestra el sensor de la figura 1(a) que utiliza un árbol hueco en vez de un árbol sólido.

La figura 1(c) muestra el sensor de la figura 1(a) con una parte del árbol de mayor diámetro en la que está formada la zona activa.

30 La figura 1(d) muestra el sensor de la figura 1(a) que incluye una zona activa AB con sólo una única dirección de polarización.

La figura 1(e) muestra el sensor de la figura 1(a) con una parte del árbol de menor diámetro en la que está formada la zona activa.

35 La figura 1(f) muestra el sensor de la figura 1(e) excepto que la zona activa con el diámetro reducido está en un árbol separado.

40 La figura 1(g) muestra el sensor de la figura 1(a) que incluye una zona activa ABCD con tres zonas circunferenciales magnéticamente contiguas y de polarización contraria.

La figura 2(a) es un gráfico que ilustra un bucle de histéresis “principal” típico.

45 La figura 2(b) es un gráfico que ilustra un bucle de histéresis “secundario” típico.

La figura 3 ilustra un alzado frontal y lateral de una instalación típica de un árbol y de imanes polarizantes para crear al mismo tiempo dos zonas polarizadas.

50 La figura 4 es un gráfico que representa la relación entre la intensidad de los imanes polarizantes y la sensibilidad del sensor resultante.

La figura 5 es un gráfico que representa la relación entre la intensidad de campo radial correspondiente que resulta de la aplicación de par y la posición axial por la zona activa del árbol.

55 La figura 6 es un gráfico que representa la función de transferencia de un sensor de par sin aro hecho con material de acero de gran velocidad y muestra la relación entre el par aplicado y la intensidad de campo radial.

60 La figura 7 es un dibujo de montaje de un sensor de par de la presente invención que muestra, en el árbol, una zona activa central formada con un material magnetostrictivo ferromagnético y zonas pasivas formadas con un material de baja permeabilidad.

La figura 8 ilustra un procedimiento para hacer el sensor de la figura 7.

65 La figura 9 es un gráfico que representa la relación entre la separación de rodillos de labrado en frío y la sensibilidad del sensor resultante.

La figura 10 es un gráfico que representa la relación entre la duración del laminado del labrado en frío y la sensibilidad del sensor resultante.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

En los últimos años ha aumentado el interés por un sensor de par magnetoelástico de tipo sin contacto que comprende un árbol, un elemento con actividad magnetoelástica dotado de anisotropía magnética uniaxial que tiene la dirección circunferencial como el eje fácil y está magnéticamente polarizado en una dirección circunferencial en la superficie del árbol y un sensor de campo magnético para detectar la intensidad del campo magnético que se produce como resultado de la aplicación del par en el árbol. Hasta aquí es más conveniente utilizar una parte físicamente separada, por ejemplo un anillo o “aro”, para realizar la función del elemento activo. En tal sensor, la anisotropía magnética uniaxial se desarrolla normalmente como resultado de una “tensión circunferencial” que proviene de un ajuste con apriete entre el árbol y el anillo. Según la presente invención, se ha descubierto que, en vez de crear una interfaz de anillo/árbol, con sus problemas asociados, un árbol policristalino en el que un predominio de la distribución de imanaciones locales se limita dentro de un cuadrante de 90° dispuesto simétricamente alrededor de la dirección de remanencia circular va a mostrar una anisotropía magnética en la dirección circunferencial suficiente para producir un campo magnético sensible a la aplicación del par en el árbol. Por tanto, parece que si se selecciona con cuidado un material de árbol ferromagnético, se puede crear una zona activa directamente en el árbol simplemente mediante polarización circunferencial. Queda claro, sin embargo, que no se pueden crear zonas adecuadamente activas en cada árbol ferromagnético. Con respecto a esto, los intereses principales son estabilidad, linealidad e histéresis.

La estabilidad, la linealidad y la histéresis son características que no son completamente independientes de un transductor de par. Por ejemplo, la presencia de histéresis es un factor que obviamente limita la linealidad. Además, como la presencia de histéresis significa que están funcionando procesos de alteración de imanación irreversible, la posibilidad de que la función de transferencia asociada a una nueva carrera del par se repita de manera precisa en la centésima repetición de la misma carrera no se sabe hasta que se prueba. En general, el cambio de un bucle de histéresis estable a otro es progresivo (un proceso denominado “reptación”). Es claramente conveniente evitar o al menos minimizar los procesos de imanación irreversible. La alteración de imanación irreversible se produce, la mayoría de las veces, mediante uno o dos procesos: movimiento de la pared del dominio y/o rotación vectorial de un eje fácil a otro. Como las anisotropías presentes en cualquier material práctico son suficientemente grandes, y como los ejes fáciles van a tener separaciones angulares sustancialmente más grandes que los ángulos de inclinación que se producen con esfuerzos torsionales experimentados de manera normal (por ejemplo 90° a diferencia de <10°), la rotación vectorial no parece suponer una amenaza significativa como causa potencial de irreversibilidad en la función de transferencia aunque la rotación vectorial entre ángulos fáciles que son casi equidistantes desde la dirección circunferencial puede estar operativa durante el funcionamiento cíclico inicial del par. De este modo, si hay una cantidad significativa de histéresis o reptación en la función de transferencia del transductor, es más probable encontrar culpable al movimiento de la pared del dominio.

La influencia del movimiento de la pared del dominio durante el funcionamiento del sensor y cómo evitar sus efectos adversos va a quedar claro una vez identificadas y examinadas aquellas características de un árbol que son activas durante la operación, y al final durante el funcionamiento, de un sensor de par sin aro. Estas características incluyen el tamaño y la forma de las zonas activas y contiguas y varias propiedades del material. Como puede verse, el funcionamiento del sensor de par depende de las interrelaciones entre varias de estas características y de la intensidad de determinadas propiedades específicas. La ilustración esquemática de la estructura básica de un sensor de par sin aro que se muestra en la figura 1(a), junto con la descripción que viene a continuación, ayudan a aclarar esto.

Refiriéndonos en primer lugar a la figura 1(a), un sensor de par según la presente invención se muestra normalmente con el número 2. El sensor de par 2 comprende un transductor 4 y un sensor vectorial de campo magnético 6. El transductor 4 comprende una o más bandas o zonas circunferenciales 8, 10 de polarización contraria, magnéticamente contiguas y axialmente distintas que definen únicamente la zona activa o transductiva del árbol 12. La zona 14 del árbol a la izquierda de A y la zona 16 a la derecha de B se diferencian de la zona activa únicamente por la ausencia de cualquier imanación remanente significativa. El árbol 12 está normalmente formado por un material magnetoestrictivo ferromagnético que tiene una estructura cristalina particularmente conveniente, como se describe con más detalle a partir de aquí, de manera que la zona activa va a estar formada, igualmente, por un material magnetoestrictivo ferromagnético con una estructura cristalina. El par 20 se aplica en una parte del árbol 12 y se transmite así a otra parte del árbol donde el movimiento del árbol 12 que se debe al par 20 realiza una tarea útil. El par 20 se muestra en el sentido de las agujas del reloj mirando hacia el extremo visible del árbol 12, aunque obviamente puede aplicarse para que gire o tienda a hacer girar el árbol en una o en ambas direcciones dependiendo de la naturaleza del árbol 12 que incorpora la máquina.

El transductor 4 está polarizado magnéticamente en una dirección pura y sustancialmente circunferencial, como se enseña en las patentes U.S. 5.351.555 y 5.520.059, al menos hasta el punto en el que, en ausencia del par 20 (en un estado de reposo), no tiene ningún componente de imanación pura en la dirección del eje 11 y no tiene componentes de imanación radial pura. La forma cilíndrica cerrada del transductor 4 mejora la estabilidad de la polarización proporcionando un circuito completo.

Como puede verse, debido a la estructura, selección de material y procesamiento del transductor 4, la aplicación de un esfuerzo torsional 12 produce una reorientación de la imanación polarizada en el transductor 4. La imanación polarizada se va haciendo cada vez más helicoidal a medida que aumenta el esfuerzo torsional. La helicoidalidad de la imanación en el transductor 4 depende de la intensidad del par 20 transmitido y la quiralidad depende de la direccionalidad del par transmitido y de las características magnetoelásticas del transductor 4. La imanación helicoidal

ES 2 301 211 T3

que resulta de la torsión del transductor 4 tiene un componente circunferencial y un componente axial por el eje 11. Es de particular importancia el hecho de que la intensidad del componente axial dependa completamente de la torsión en el transductor 4.

5 El sensor vectorial de campo magnético 6 es un dispositivo detector de vectores de campo magnético situado y orientado en correspondencia con el transductor 4 para detectar la intensidad y polaridad del campo que proviene del espacio que rodea el transductor 4 como resultado de la reorientación de la imanación polarizada desde la dirección circunferencial estable a una dirección helicoidal más o menos inclinada. El sensor vectorial de campo magnético 6 proporciona una señal de salida que indica la intensidad del par 20. En una realización preferida, el sensor vectorial de campo magnético 6 es un sensor de efecto Hall con circuito integrado. Unos cables 24 conectan el sensor vectorial de campo magnético 6 a una fuente de energía directa, y transmiten la señal de salida del sensor vectorial de campo magnético 6 a un dispositivo receptor (no se muestra), tal como un circuito de control o de monitorización para el árbol 12 que incorpora la máquina o el sistema. Una descripción más detallada de los tipos, características, colocaciones y funcionamiento de los sensores vectoriales de campo magnético aparece en las patentes U.S. 5.351.555 columnas 6-9 15 y 5.520.059 columnas 7-11 y 25.

Las dos zonas polarizadas circunferencialmente 8, 10 juntas constituyen la zona activa del transductor 4. El sensor de campo que se muestra está centrado en la "pared" entre las dos zonas de polarización contraria y orientado para detectar el campo radial en ese emplazamiento. Se pueden utilizar uno o más sensores de campo magnético. En general, cada uno de tales sensores estaría situado cerca de la zona activa y orientado para tener la máxima efectividad a la hora de detectar el campo que se crea cuando el árbol está transmitiendo un par. La similitud entre este transductor y el diseño más convencional de las patentes U.S. 5.351.555 y 5.520.059 que emplea una zona activa dotada de anisotropía circunferencial uniaxial ("sensor de anillo") es obvia. Algunas de las diferencias son también obvias y otras son más sutiles:

1. La zona activa en este diseño sin aro básico se caracteriza únicamente por la existencia de las imanaciones remanentes que se indican. Partes del árbol a la izquierda de A y a la derecha de B se diferencian de la parte que está entre A y B únicamente por la ausencia (en tales partes) de cualquier imanación remanente apreciable. Así, exceptuando las razones secundarias asociadas a otras funciones de árbol, o para identificar visualmente la zona activa u optimizar alguna característica del funcionamiento del transductor, ni la composición química, ni el estado metalúrgico, ni el diámetro, ni el tratamiento de superficie ni el acabado del árbol entre A y C es diferente de las partes que están a la izquierda de A o a la derecha de C. Aunque la zona activa dual, es decir dos anillos circunferenciales de polarización contraria y magnéticamente contiguos, tiene la disposición preferida con respecto a la presente invención (si se compara con una única zona polarizada como en la patente U.S. 5.351.555), las razones para esta preferencia tienen más que ver con conseguir el gradiente de imanación claramente definido en B (y por tanto una fuerte divergencia cuando estas imanaciones se inclinan con la torsión) que con evitar los efectos ambiguos de los campos axiales ambientales en los límites definidos con menos claridad que hay entre zonas imanadas circularmente y zonas sin imanación remanente en A y C. Con respecto a esto, hay que observar que si A y C representan los extremos de una zona activa con una sola dirección de remanencia circular, cuando un campo axial inclina el componente axial, este más o menos coincide con el componente axial que se forma en el interior de las zonas no polarizadas que están a la izquierda de A y a la derecha de C. De este modo, a menos que la zona activa esté cerca de un extremo del árbol, los campos axiales producen poca divergencia en la imanación axial, y por esta razón un campo de la "señal". Por otro lado, el esfuerzo torsional aunque también hace que la remanencia circular cree un componente axial, no altera el componente axial de imanación de las zonas no imanadas del árbol. Por tanto, hay una divergencia de este componente y se crea por esta razón un campo externo. Esta divergencia se reduce con respecto a la que se produce en B en la configuración de zona dual, no solamente porque la polaridad de la remanencia se invierte en B, sino porque el proceso de polarización da como resultado un gradiente más difuso en la remanencia en A y C. Con respecto a esto, puede ser en realidad conveniente difundir deliberadamente los "bordes" de la remanencia circular de A y C con miras a reducir la intensidad del campo en estas zonas reduciendo así los efectos de estos campos sobre el material del árbol adyacente.
2. Como la zona del campo activo (generación de campo) forma parte integrante de un árbol homogéneo, el material del árbol puede ser ferromagnético. Cuanto mayor sea la imanación de saturación, mayor será la posibilidad de que se genere un campo magnético dependiente del par. Los aceros al carbono ordinarios e hipoleados tienen imanaciones de saturación dentro del mismo campo que las del hierro elemental ($4\pi M_s = 21.600 \text{ Gauss} = 2,16 \text{ Tesla}$). La aleación normalmente reduce el M_s más o menos en proporción al porcentaje de elementos de aleación no ferromagnéticos. El níquel en pequeñas cantidades tiene poco efecto, el cobalto aumenta el M_s . Algunos aceros de gran resistencia están hiperaleados, teniendo hasta un 30% de constituyentes combinados que no son de hierro. Sin embargo, cualquiera de los aceros ferromagnéticos que pueden usarse para árboles van a tener indudablemente un M_s dentro del 20% del que tiene el hierro. Por tanto, el valor real de M_s del material del árbol específico tiene un impacto independiente limitado sobre el funcionamiento del transductor de par.
3. La zona activa, y por tanto el mismo árbol pueden ser magnetoestrictivos. El producto de la magnetoestricción λ y el esfuerzo torsional principal δ proporcionan la influencia anisótropa magnetoelástica fundamental para el funcionamiento del transductor. Al igual que el sensor de par de la patente U.S. 5.351.555, es es-

ta anisotropía la que inclina el eje fácil en una dirección axial o en la otra, creando así la divergencia de imanación que es la fuente del campo de la señal. Los cristalitos individuales que forman los materiales policristalinos con los que se fabrican los árboles casi nunca tienen magnetoestricciones isotrópicas. En el hierro, λ es particularmente anisotrópico, incluso hasta el punto en que varía de señal según la dirección en la que se imane el cristal. Por ejemplo, cuando un único cristal de hierro desimanado de manera ideal se imana paralelo a una arista de un cubo, su longitud en esa dirección aumenta 20 ppm; cuando se imana en paralelo a una diagonal de un cubo, disminuye su longitud en esa dirección 21 ppm. En el lenguaje de los magnetistas, $\lambda_{100} = -21$ ppm. Pequeños porcentajes ($\approx 3\%$) de algunos elementos de aleación, por ejemplo Ni y Si, reducen el valor absoluto de λ_{111} dando como resultado una magnetostricción más isotrópica. Existen dos puntos que hay que recordar aquí. En primer lugar, se debe entender que no hay paredes de dominio en el estado de remanencia, o, si se ha formando alguna pared de 90° como resultado de los campos internos, que éstas se han fijado de manera eficaz. En segundo lugar, como la imanación estable se produce por los ejes easy (por ejemplo, en direcciones $\langle 100 \rangle$ en árboles de acero típicos), ésta debe girar alejada de estos ejes fáciles mediante la anisotropía $\lambda\delta$. Con el fin de obtener una función de transferencia lineal, es conveniente que la energía magnetoelástica permanezca en proporción directa con el par (es decir, con δ). Por tanto, es conveniente que λ permanezca constante a medida que los vectores de imanación giran alejados de los ejes fáciles estables mediante $\lambda\delta$. En algunos cristales, dependiendo de su orientación, la rotación en la dirección $+\delta$ va a acercar el vector a la dirección $\langle 111 \rangle$, de aquí que, si λ_{111} es negativo, va a haber, entre las direcciones $\langle 100 \rangle$ y $\langle 111 \rangle$, un punto de compensación donde $\lambda\delta = 0$ para cualquier valor de δ . En hierro y aceros puros con un contenido de aleación muy bajo, incluso $\langle 110 \rangle$ es negativo con lo cual no es posible evitar con estos materiales este estado no deseable para cualquier orientación cristalina. Esta es la razón por la cual Ni y Si son elementos de aleación convenientes.

4. La zona activa, y por tanto el mismo árbol deben poseer alguna fuente de anisotropía para devolver la imanación a la dirección circunferencial establecida (durante el proceso de polarización) cuando el par se reduce a cero. Para asegurar una respuesta simétrica a los pares CW y CCW, la distribución de esta anisotropía estable debe ser simétrica alrededor de la dirección circunferencial. Para asegurar que la anisotropía magnetoelástica asociada con el par haga que todas las partes imanadas de manera remanente del árbol contribuyan conjuntamente al desarrollo de un componente axial, la anisotropía estable no debe desviarse más de 45° de la dirección circunferencial. Dicho de otro modo, la necesidad de anisotropía es una expresión de la necesidad de limitar la remanencia circular al interior del cuadrante de 90° orientado circunferencialmente. Se puede obtener un funcionamiento satisfactorio si al menos un 50% de la imanación local se encuentra dentro del cuadrante de 90° que está simétricamente dispuesto por la dirección de la remanencia circular. Si la anisotropía estable tiene como fuente principal la anisotropía magnetocristalina asociada con las instalaciones atómicas de una estructura de celosía que posee simetría multiaxial, por ejemplo un material policristalino orientado aleatoriamente en el que cada cristalito tiene simetría cúbica (incluida la simetría cúbica distorsionada, por ejemplo tetragonal) con $\langle 100 \rangle$ o $\langle 111 \rangle$ ejes fáciles, la remanencia circunferencial estable en más de un 50% de los cristalitos va a cumplir automáticamente el requisito de los “ 45° ”. La anisotropía magnetocristalina en hierro y en todos los aceros comunes tiene tal simetría cúbica y por esta razón (en base únicamente a este requisito) son todos materiales candidatos a transductores de par sin aro. La intensidad de la anisotropía del hierro puro se reduce generalmente mediante elementos de aleación comunes, aunque el tungsteno y, en menor medida, el manganeso hacen que aumente. El molibdeno, el vanadio y el estaño hacen que descienda un poco, mientras que el cromo es un poco menos lento a la hora de hacer que la anisotropía disminuya con respecto a la del Fe puro. Unas cantidades suficientes de Ni, Co o Al pueden hacer que la anisotropía descienda a cero (y por debajo de cero). En transductores de par sin aro, nos preocupa que la intensidad absoluta de la anisotropía cristalina (abreviatura de magnetocristalina) sea demasiado baja, ya que ésta es el “resorte” que devuelve la imanación a su dirección circunferencial estable cuando se retira el par. Así, por ejemplo, si la anisotropía cristalina (K_1) es menor que $\lambda\delta_r$, donde δ_r es la intensidad de esfuerzos residuales asociados con el procesamiento anterior del árbol, entonces K_1 ya no es la anisotropía principal y más del 50% de la remanencia estable ya no puede cumplir el requisito de distribución de 45° . Este es el primer indicio de la importancia de las interrelaciones entre las propiedades de los diferentes materiales que son importantes por separado para el funcionamiento del transductor. Mientras que K_1 y λ son propiedades que dependen de su composición (intrínsecas), δ_r y otras propiedades que dependen de su estructura (por ejemplo, texturas, y disposición química o estructural) actúan de acuerdo con las propiedades intrínsecas para determinar la intensidad, orientación y simetría de las anisotropías estables. Además, aunque pequeñas cantidades de Ni o Si aumentan de manera efectiva λ , también tienden a reducir K_1 . Por tanto, al seleccionar la aleación adecuada para el árbol, tenemos que moderar con cuidado el contenido de la aleación.
5. Aunque ahora se debe entender que en la presente invención el mismo árbol tiene que ser ferromagnético, magnetostrictivo y proporcionar la intensidad y distribución de orientación necesarias de anisotropía magnética, hasta ahora, no se ha considerado la respuesta de la imanación del árbol a los campos magnéticos. Los materiales ferromagnéticos se caracterizan perfectamente por la intensidad de los cambios de imanación inducidos por los campos magnéticos y por la intensidad de los campos necesaria para inducir cambios de imanación significativos. Como estas características no son funciones de una variable valoradas por separado, se describen de manera conveniente mediante un gráfico de imanación M frente al campo H ya que H varía cíclicamente dentro de una gama bipolar simétrica. Las características más notables de tal bucle de histéresis principal se indican en la figura 2(a), que se describe con más detalle a partir de ahora,

ES 2 301 211 T3

en donde las diferentes pendientes y ordenadas varían de un material a otro, las pendientes representan susceptibilidades locales, las ordenadas del eje y son la imanación remanente y las del eje x, la fuerza coercitiva.

5 Las pendientes que cambian por las diferentes partes del bucle de histéresis reflejan los diferentes procesos implicados en los cambios de imanación que se producen en campos de diferentes intensidades. Nuestro interés por estos detalles no es únicamente académico ya que, durante el funcionamiento del transductor de par sin aro, provienen campos magnéticos de la zona activa y estos campos se extienden no sólo por el espacio en el que está situado el sensor o los sensores de campo sino también por el espacio que ocupa el mismo árbol. Los cambios de imanación generados en las partes no activas del árbol se producen en otros campos que surgen y estos campos (parasitarios) también se extienden por las zonas del espacio en el que está situado nuestro sensor o sensores de campo. Por tanto, con miras a no perturbar la función de transferencia de la zona activa, es importante que los campos parasitarios sean muy pequeños, idealmente cero, en comparación con el campo de la zona activa o, si existe una intensidad significativa, que cambien linealmente y anhisterésicamente (o que no cambien en absoluto) con par aplicado, y que se establezcan con el tiempo y en cualquiera de las condiciones de funcionamiento y medioambientales a las que se puede someter el árbol. Dicho de otro modo, cualquier campo parasitario que se produzca tiene que ser lo suficientemente pequeño en comparación con el campo de zona activa para que el campo neto visto por los sensores de campo sea útil con fines de detección de par. Como los campos parasitarios tienen como fuente la imanación en las partes no activas del árbol, es claramente conveniente que tal imanación se mantenga pequeña, o, si tiene una intensidad significativa, que cambie poco bajo la acción de los campos generados por la zona activa (y otros campos ambientales o accidentalmente impuestos). Se pueden asegurar pequeñas imanaciones si M_s es pequeño o si la susceptibilidad ($X = \Delta M / \Delta H$), o su pariente cercano, permeabilidad ($\mu = X + 1$) es pequeña. Es claramente imposible (en este diseño sin aro básico) que M_s sea pequeño ya que es preferible un M_s grande para la zona activa. De este modo, para minimizar la influencia perturbadora de los campos parasitarios, es importante utilizar un material de árbol con una X pequeña en cualquier valor de campo al que pueda exponerse. El valor de X depende de si el cambio de imanación se debe principalmente a la rotación vectorial o al movimiento de las paredes de dominio. La anisotropía soporta la rotación vectorial, mientras que el movimiento de las paredes de dominio lo soporta la heterogeneidad. La coercitividad proporciona una medida de la dificultad experimentada por el campo para alterar la imanación. El campo coercitivo H_c se define como la intensidad de campo necesaria para reducir la imanación remanente (la imanación que permanece después de haber sido expuesto a un campo saturante) a cero. De este modo, en H_c , se ha invertido el 50% de la imanación. Si la inversión de imanación la produce únicamente la rotación vectorial, H_c (para tales procesos H_c también se denomina campo crítico), en materiales compuestos de cristallitos orientados de manera aleatoria que tienen una simetría cúbica con $K_1 > 0$, es igual a $2K_1/M_s$. Para hierro, $K_1 = 45.000 \text{ ergs/cm}^3$ y $4\pi M_s = 21.600 \text{ Gauss}$, H_c para rotación vectorial es 524 Oe. Los valores medidos de H_c para carbono ordinario y aceros hipoaleados oscilan normalmente entre 5 y 50 Oe (incluso más bajos para hierro recocido) dependiendo del contenido de aleación y de los tratamientos térmico o mecánico. Por tanto queda claro que el proceso principal mediante el cual se altera la imanación en estos materiales no es la rotación vectorial sino que más bien es el movimiento de paredes de dominio. También queda claro que un material que tiene $H_c = 50 \text{ Oe}$ es mejor para usarlo en un sensor de par sin aro que un material que tiene $H_c = 5 \text{ Oe}$. En consecuencia, serían aún mejores valores todavía más altos de H_c , por ejemplo 524 Oe. En cualquier acero, H_c puede aumentarse mediante un factor de 5 o más mediante labrado en frío o termotratamiento. H_c es normalmente más alto en el estado mecánicamente más duro (más fuerte). Esto se deduce del hecho de que la intensidad refleja la presencia de impedimentos al flujo (deslizamiento) de una capa de átomos sobre otra dentro del cristal (dislocaciones, huecos, inclusiones, precipitados, distorsiones reticulares debidas a átomos intersticiales, esfuerzos, etc.) y H_c refleja el efecto de sujeción en paredes de dominio de estas mismas heterogeneidades en la estructura cristalina.

45 Los efectos contradictorios, a menudo opuestos, de los diferentes materiales y parámetros magnéticos, como se ilustra antes, presentan un dilema en el diseño de transductores de par sin aro. Con el fin de tener dispositivos de detección de campo económicos que detecten fácilmente campos magnéticos de desarrollo de par y para que sean mayores que los campos ambientales que normalmente se encuentran, es conveniente que la zona activa produzca campos lo más grandes posible (favorece λ/K_1 alto, M_s alto). Aún si estos campos tienen suficiente intensidad para producir cambios en la imanación dentro de la zona activa, la función de transferencia no va a ser estable con niveles de par altos (favorece K_1/λ alto, M_s bajo). Si estos campos tienen suficiente intensidad en partes del árbol que están cerca de la zona activa, los campos parasitarios resultantes no pueden perturbar la función de transferencia del transductor en modos (histéresis, inestabilidad y no linealidad) que disminuyan o destruyan la utilidad del dispositivo (favorece M_s , λ y X bajos, H_c y K_1 altos). Los problemas se pueden mitigar inmediatamente si las paredes de dominio se pueden sujetar de manera suficientemente segura para elevar el H_c real hasta cerca del límite establecido por la anisotropía. Aunque principalmente es un problema de materiales, la selección de un material de árbol, los procesos usados para fabricar el árbol y sus posteriores tratamientos mecánicos y térmicos se hacen normalmente y ante todo para desempeñar de la mejor manera la función de árbol principal, es decir, la transmisión de par, con poca preocupación de si estos factores cumplen las preferencias para la detección de par.

65 Se debe hacer hincapié en que la descripción anterior se refiere al diseño sin aro más simple o básico que se ilustra en la figura 1(a). Como se aclara después en otras realizaciones de la presente invención, que se describen después, no hay nada en el concepto de un diseño sin aro que prohíba la alteración de la zona activa (o las partes no activas del árbol) para obtener mejores combinaciones de las propiedades significativas que existen en otras partes del árbol. Así, no es esencial para el concepto de un transductor sin aro que la presencia de una imanación remanente sea la única característica que diferencie la zona activa de zonas contiguas al árbol. En la patente 5.391.555, columnas 4-15 se describen varios tratamientos locales y otras modificaciones y se incorporan aquí como referencia.

ES 2 301 211 T3

Parece que otras variantes del diseño sin aro básico, en base a la presente interpretación, nos llevan a mejorar el funcionamiento. Por ejemplo, con referencia a la figura 1(C), si se aumenta el diámetro del árbol una extensión axial limitada, éste se imanaría circunferencialmente (es decir, la zona activa está sobre un escalón), la intensidad del campo de la señal en las partes (ahora no muy) próximas del árbol se reducirían incluso si la zona activa produjera el mismo campo por par unitario como el diseño básico de diámetro de la figura 1(a). Además, el sensor o sensores de campo estarían ahora más lejos de la fuente de campos parasitarios.

Como ya se ha mencionado, se demuestra que es conveniente “inclinarse” la imanación circunferencial, difundiendo así los bordes A y C de la zona activa que se muestra en la figura 1(a). La finalidad aquí es reducir los campos parasitarios de las partes inactivas del árbol, tanto reduciendo la intensidad del campo de la señal en estas partes (que reduce la imanación de estas partes) como reduciendo la intensidad de los campos que dependen del par que surgirían de estas partes cuando el campo de la señal los imanara. Este enfoque puede aplicarse fácilmente inclinando los alrededores de la zona activa o la intensidad de los imanes usados para crear las polarizaciones que forman la zona activa.

Por varias razones, parece que los árboles huecos templados en toda su masa, como se muestra en la figura 1(b), son mejores que los árboles cementados o sólidos. Un árbol hueco se somete a esfuerzo de manera más uniforme mediante torsión que un árbol sólido, por tanto toda la sección transversal puede intervenir en el campo de la señal. No es posible crear una remanencia circular a través de un árbol sólido. Incluso si se aplica esto a un árbol de mayor diámetro llega a ser poco práctico. Incluso aunque se pudiera conseguir una imanación circular, las zonas centrales del árbol ayudarían poco al campo de la señal ya que éstas se someten a poco esfuerzo. Además, estas zonas centrales se convierten en “material permeable aproximado” y bien podrían ser una fuente de los campos parasitarios, disminuyendo así el funcionamiento del transductor de par en vez de ayudarlo. Esta propiedad potencialmente negativa de los árboles sólidos, en general, empeoraría ya que, incluso en árboles templados en toda su masa (en donde la dureza se obtiene como resultado del templado), las zonas centrales no son normalmente tan duras como las zonas superficiales y por esta razón van a tener un H_c menor. Por estas razones, parece que el temple en toda su masa es más conveniente que el cementado. Por otro lado, el temple superficial mediante nitruración puede ser beneficioso ya que puede aumentar más la dureza de algunos aceros elevando así probablemente el H_c . También se sabe que los tratamientos criogénicos aumentan sustancialmente la dureza de los materiales de árbol usados normalmente (cementados) (por ejemplo, entre Rockwell 60 a 64 para 8620 y entre R55 y R62 para 4320). Tales tratamientos también pueden elevar el H_c .

La figura 1(d) ilustra el mismo sensor que el de la figura 1(a) excepto en que la zona activa está polarizada en una sola dirección. Esta estructura es adecuada para árboles sólidos o huecos aunque no es buena para árboles escalonados ya que las zonas extremas (A y B) desarrollan polos en un campo magnético axial. Se ha encontrado que la colocación de un segundo sensor en el extremo derecho de la zona activa (se muestra con líneas de trazos) ayuda a reducir la sensibilidad a los campos ambientales en la dirección diametral.

La figura 1(e) ilustra el mismo sensor que el de la figura 1(a) excepto en que el diámetro del árbol en la zona activa es más reducido que el del árbol principal. En esta configuración, los “polos” magnéticos que se forman en A y C cuando el árbol incluye par, son menos efectivos para imanar el mayor volumen de material en las zonas contiguas. Esto va a reducir la intensidad de los campos parasitarios que ayudan a estas zonas. Esta estructura también permite colocar el sensor o sensores de campo radialmente hacia dentro desde las superficies de las secciones de diámetro más grande, hasta emplazamientos donde se reduce la intensidad de los campos parasitarios. Al igual que con el diseño escalonado de la figura 1(d), esta estructura no es adecuada para usar con una única zona polarizada.

La figura 1(f) ilustra el mismo sensor que el de la figura 1(e) excepto en que la zona activa está ahora formada en un árbol separado. Aunque se muestra con un diámetro reducido por toda su longitud, la sección entre A y C de este árbol magnetoelásticamente activo puede de hecho tener el mismo diámetro o un diámetro mayor que las secciones de diámetro del árbol principal al que está unido (que no necesita tener el mismo diámetro en cada extremo). El árbol activo puede unirse de manera rígida a los árboles principales mediante ajustes con apriete, clavamiento, soldadura, hilos de rosca o equivalentes. Los árboles principales están hechos preferiblemente con un material no ferromagnético, por ejemplo acero inoxidable, latón de aluminio, fibra de vidrio, plástico, etc., aunque también pueden hacerse con un material ferromagnético poco permeable, de preferencia con una magnetostricción baja, por ejemplo acero al carbono ordinario templado, y no pueden crear campos parasitarios significativos. El árbol activo puede ser hueco o sólido y está circunferencialmente polarizado únicamente entre AB y BC. Como las zonas AA' y CC' también incluyen porcentajes menores del par, sus ayudas a los campos parasitarios son mínimas. También aquellas partes del árbol activo que no están en la zona activa no pueden acceder fácilmente a fuentes locales de campos posiblemente perturbadores tales como herramientas imanadas (destornilladores, llaves inglesas, etc.).

La figura 1(g) ilustra el mismo sensor que el de la figura 1(a) excepto en que tiene tres (3) zonas circunferencialmente polarizadas y dos (2) “paredes de dominio” con una fuerte divergencia (en B y C). La intensidad de campo aumentada entre medias también permite el uso de un solo sensor de campo axialmente orientado (se muestra en líneas discontinuas) en vez de dos sensores de campo, uno en cada pared del dominio.

La figura 2(a) ilustra la forma y las características más notables de un bucle de histéresis “principal”, es decir uno en el que los campos restrictivos son suficientes para que la imanación muestre signos de saturación cercana. Esto se demuestra por el achatamiento de los extremos del bucle y la reducción de la diferencia de imanaciones entre “curvas” ascendentes y descendentes del bucle. Los bucles de histéresis representan de manera efectiva fenómenos dinámicos;

ES 2 301 211 T3

son atravesados en el sentido contrario al de las agujas del reloj - hacia arriba y hacia la derecha, hacia abajo y hacia la izquierda, etc. Para el bucle principal que se muestra aquí, debe quedar claro que más aumentos en el campo que sobrepasen ± 100 Oe no van a elevar las imanaciones máximas significativamente por encima de ± 18 kG. Cuando el campo se reduce a cero una vez alcanzados estos valores de “saturación técnica”, la imanación “retrocede” a un valor que se indica como R (o R' para campos de polaridad contraria). R y R' representan la imanación “remanente”. El valor de R en el bucle que se muestra es de 15,8 kG. La “relación de remanencia”, es decir, la relación entre la imanación remanente y la imanación máxima, para este bucle es $(15,8/18) = 0,878$. En un material con anisotropía uniaxial en la dirección de campo, la relación de remanencia sería igual a 1,00, su valor más alto posible. Si la dirección de campo es perpendicular a la anisotropía en tal material, la relación de remanencia sería cero, su valor más bajo posible. En un material que tiene una orientación aleatoria de cristalitas cúbicas con ejes fáciles por las aristas del cubo, este ratio sería de 0,8312. Si los ejes fáciles estuvieran por diagonales de cubo, la relación de remanencia sería de 0,866. La relación de remanencia relativamente alta del bucle que se muestra en la figura 2(a) indica que los cristalitas no están orientados aleatoriamente o que está presente alguna otra influencia anisotrópica. En cualquier caso, bucles de histéresis para otras direcciones de campo mostrarían normalmente relaciones de remanencia mayores o menores (diferentes).

El valor del campo en el que la imanación se reduce a cero (puntos C y C'), es el “campo coercitivo”. El campo coercitivo normalmente aumenta al aumentar las carreras de campo máximas, llegando a un valor máximo (denominado la “fuerza coercitiva”) en el punto de saturación. El campo coercitivo en el bucle que se muestra es de 30 Oe, un valor únicamente un poco menor que la fuerza coercitiva del material hipotético que muestra el bucle que se indica. Si la inversión de imanación entre R y C se hiciese mediante rotación coherente (en cada dominio) de los momentos locales frente a una anisotropía cristalina de $400.000 \text{ ergs/cm}^3$ (un valor típico para aceros hipoaleados), la fuerza coercitiva sería $2 \times 400.000 / (18.000 / 4\pi) = 559$ Oe cerca de 19 veces el valor observado. De este modo, si el bucle mostrado es para un material de este tipo (por ejemplo acero hipoaleado), la inversión de imanación se produce principalmente y de forma clara mediante el desplazamiento de la pared del dominio en vez de mediante rotación coherente.

A y A' en la figura 2(a) indican los extremos de un bucle de histéresis “secundario”, es decir, un bucle en el que las carreras de campo máximas son significativamente menores que la fuerza coercitiva. Una vista aumentada de este bucle secundario se muestra en la figura 2(b). Aunque la remanencia y el campo coercitivo de este bucle se ven bastante pequeños, estos no son cero. Por tanto, incluso para carreras de un campo aplicado, se ve que las alteraciones de imanación incluyen un poco de irreversibilidad. Cuanto más pequeña es la carrera de campo de un bucle secundario, con respecto a la fuerza coercitiva, más pequeñas son estas características irreversibles. Para carreras de campo muy pequeñas (relativas), el “bucle” se reduce a una línea recta a través de AA'. En cualquier caso, la pendiente de la línea recta a través de AA' de bucles secundarios se conoce como susceptibilidad reversible (X_{rev}). En un espécimen imanado, el valor de (X_{rev}) cambia poco (quizás $\pm 15\%$) en cualquier punto del bucle principal dentro del campo coercitivo. Aunque los bucles secundarios para material uniaxial no muestran ni remanencia ni coercitividad, normalmente muestran un (X_{rev}) finito en campos perpendiculares a la anisotropía y (X_{rev}) cero (para anisotropía perfectamente uniforme y coherente) en campos paralelos al eje de anisotropía.

El hecho de que la mayoría de los materiales muestren una remanencia X_{rev} y una coercitividad finitas, incluso en campos pequeños, es claramente apropiado para el funcionamiento de transductores de par sin aro. Debido a su (X_{rev}) finita, las zonas del árbol expuestas a los campos generados por la zona activa cuando se aplica el par en el árbol desarrollan una imanación. Dentro de la misma zona activa, estos campos se denominan campos “desimanantes” ya que actúan en una dirección que tiende a oponerse a la inclinación de la imanación circular estable. Como tales campos nunca pueden ser más fuertes que sus agentes causativos, su acción consiste simplemente en reducir el efecto del par, es decir, reducen la sensibilidad potencial del transductor. Debido a la remanencia y coercitividad finitas del material del árbol, la imanación reactiva en las zonas no activas varía en un modo histerésico con el par aplicado. Como los campos causativos también se desprenden con la distancia de la zona activa, estas imanaciones reactivas no son uniformes. Tampoco se dirigen circunferencialmente. Además, como el material de árbol es magnetostrictivo, la imanación en las zonas imanadas reactivamente va a variar según el par aplicado. Por consiguiente, estas mismas zonas anteriormente pasivas y recientemente imanadas aportan componentes de campo en el espacio interno del árbol y en el espacio que lo rodea. El campo neto visto por los sensores de campo (es decir el campo de la señal) es así el resultado del campo propuesto desde la zona activa y los campos parasitarios desde las zonas reactivas. Como era de esperar, la función de transferencia lineal y no histerésica ideal del transductor puede verse perturbada por la inevitable presencia, en diseños sin aro, de material imanable próximo. La conveniencia de mantener la coercitividad alta debe quedar ahora clara.

El funcionamiento del transductor requiere que la “superficie” del árbol esté imanada de manera remanente en una dirección circunferencial. El material que no esté imanado circunferencialmente puede llegar a imanarse de manera reactiva y convertirse así en una fuente de campos parasitarios. Aunque, en lo que se refiere a profundidad de imanación, parece, por tanto, que es mejor cuanto más profunda, dos factores reducen la necesidad de imanar circunferencialmente toda la sección transversal del árbol. En primer lugar, la reducción del esfuerzo cortante torsional a medida que aumenta la distancia desde la superficie, reduce la aportación potencial relativa al campo de la señal desde las zonas más centrales de la sección transversal de árbol. En segundo lugar, aunque estas zonas más profundas desarrollaran intensidades de campo útiles en su emplazamiento, su aportación a la intensidad del campo en el emplazamiento del sensor de campo (un poco alejado radialmente hacia fuera de la superficie del árbol) se reduciría sustancialmente. Estos mismos factores reducen la posibilidad de que zonas profundas interiores imanadas no circunferencialmente

produzcan campos parasitarios significativamente molestos en sensores de campo “alejados”. El primer factor limita la profundidad de la imanación circunferencial requerida en árboles pequeños a quizás el 50% del radio. El segundo factor indica que incluso en árboles muy largos, una imanación circunferencial más profunda de entre 10 y 20 mm proporcionaría muy pocos beneficios. En muchos árboles huecos, las penetraciones a tales profundidades llegarían a la superficie interior. Este estado sería conveniente para árboles huecos, especialmente para árboles huecos de paredes delgadas, ya que se hacen huecos para usar de manera más eficaz la resistencia del material disponible y reducir peso. Si toda la sección transversal del árbol transmite un par útil, tendría sentido que toda la sección transversal aportara el campo de la señal en vez de tener parte de la misma separada del campo de la señal y después aportara los campos parasitarios. En la práctica, sin embargo, es extremadamente difícil imanar a una profundidad mayor de aproximadamente entre 1 y 2 mm, incluso en árboles con un diámetro grande, ya que ahora es difícil generar un campo magnético suficientemente intenso desde la fuente de campo magnético.

Teniendo en cuenta el medio disponible para crear imanación circunferencial, el no tener que polarizar toda la sección transversal es casual. En las patentes U.S. 5.351.555, columnas 13 a 14 y 5.520.059, columnas 15 a 16 y 26 a 28 y en la J. Appl. Phys. 79 (8), 4756.1996, se describen métodos y procedimientos de polarización. La creación de la zona activa en transductores de par sin aro necesita otros dos factores a tener en cuenta. En primer lugar, como la zona activa tiene normalmente una extensión axial limitada y se va a colocar en una posición axial deseada por el árbol, no son adecuados los procedimientos que implican la conducción de corrientes eléctricas a través de todo el árbol o a través de conductores coaxiales que atraviesan árboles huecos. Aunque son posibles varias configuraciones para hacer pasar corrientes eléctricas a través de longitudes axiales limitadas y bien definidas, éstas tendrían una aplicabilidad restringida y no ofrecerían ninguna ventaja conocida. La polarización mediante rotación a través del campo con una intensidad fuerte, de imanes permanentes o electroimanes próximos es el procedimiento preferido ya que puede usarse el mismo equipo y proceso de polarización para una amplia gama de diámetros y material de árbol. Con este procedimiento, la longitud axial de la zona activa y su emplazamiento axial pueden controlarse de manera exacta. En segundo lugar, la polarización de transductores de par sin aro va a necesitar campos imanantes más intensos que la polarización de diseños de “anillo sobre árbol” convencionales. Esto deriva directamente de las comparaciones de los bucles de histéresis principales de materiales que son respectivamente adecuados para cada diseño y de considerar que la penetración del campo imanante en diseños sin aro va a ser en general mayor que en diseños de anillo delgado para el mismo tamaño de árbol y que las zonas internas de los árboles usados en diseños sin aro tienen de manera inherente mayores permeabilidades que los árboles usados con diseños de anillo. El material permeable próximo tiende a “cortocircuitar” el flujo procedente de los imanes polarizantes, disminuyendo así la intensidad de campo que se puede realmente obtener. Sin embargo como ya se ha comentado, el resultado es el mismo - el material permeable que está entre el imán generador y el seleccionado protege al seleccionado del campo del imán. En este caso, las zonas superficiales protegen las zonas internas limitando así la profundidad de polarización. Como se muestra en la IEEE Trans. Mag 28(5), 2202, 1992 (figura 5) y en la figura 5 del citado documento J. Appl. Phys., los bucles principales de anillos que están bajo tensión circunferencial son cuadrados (anisotropía axial) y normalmente muestran campos coercitivos de solamente unos cuantos oersted. Por otro lado, los bucles principales de materiales de árbol de transductores de par van a mostrar rasgos más redondeados (anisotropía cúbica aleatoria) y coercitividades superiores a aproximadamente 15 Oersted. Se prefieren coercitividades de 35 o más. Como los “lóbulos” de campo inverso del campo procedente del imán imanante son los que llevan a cabo la polarización y como la intensidad de estos lóbulos es de únicamente más o menos el 20% del lóbulo de campo directo, y también como la “saturación técnica” (necesaria para maximizar la remanencia) requiere campos de al menos dos veces la fuerza coercitiva del material de árbol, y finalmente, como es mejor una fuerza coercitiva grande para minimizar campos parasitarios y maximizar la estabilidad, queda clara la necesidad de imanes polarizantes fuertes para diseños sin aro. Con árboles huecos que tengan un diámetro suficientemente grande, puede ser ventajoso, en lo que se refiere a obtener una polarización profunda uniforme de la zona activa, emplear imanes polarizantes internos y externos que cooperen entre sí. Una instalación típica de árbol e imanes polarizantes se ilustra en la figura 3 que muestra una instalación de imanes polarizantes y un árbol para crear al mismo tiempo dos (2) zonas contiguas magnéticamente polarizadas, como en el diseño sin aro que se ilustra en la figura 1(a). El número de fuentes de campos polarizantes va a ser en general el mismo que el número de zonas polarizadas que se crean.

En la realización más sencilla, los imanes polarizantes consisten normalmente en imanes permanentes de alta energía (por ejemplo, samario-cobalto o neodimio-hierro-boro) que se retienen cerca la superficie del árbol mientras el árbol gira alrededor de su eje en cualquier dirección. Con árboles de mayor coercitividad, se pueden asegurar “piezas de polo” magnéticas suaves en cada imán permanente y conformarlas y separarlas de manera adecuada para usar de la manera más efectiva el imán disponible mmf (para dirigir flujo magnético a través del árbol). La figura 3 muestra dos de tales imanes polarizantes “1” y “2”, con polaridades contrarias respectivamente y un poco separadas axialmente. Las flechas en negrita en el árbol indican las direcciones de las imanaciones remanentes circunferenciales resultantes, es decir, las zonas polarizadas, que juntas constituyen la zona activa del transductor. Las líneas perpendiculares al eje del árbol son los salientes de los límites de estas zonas polarizadas. Se puede observar que la anchura (la extensión axial) de estas zonas sobrepasa un poco la anchura de los imanes polarizantes. La parte sombreada que está entre dos zonas de polarización contraria representa una subzona dentro de la cual la imanación remanente realiza una transición de una dirección circular a la otra. La anchura de esta zona de transición puede hacerse más grande según se desee simplemente aumentando la separación de los dos imanes polarizantes. Aunque la anchura de la zona de transición puede disminuirse disminuyendo esta distancia de separación, existe una distancia de separación mínima más allá de la cual la zona de transición no va a disminuir. Debe quedar claro que a medida que los imanes 1 y 2 se acercan entre sí, sus campos correspondientes se debilitan entre sí. Cuando se acercan lo suficiente para tocarse, ya no va a haber más polo Norte ni polo Sur en su interfaz, por tanto va a haber una distancia determinada por los mismos

ES 2 301 211 T3

imanes antes de que haya una intensidad de campo adecuada en la dirección circunferencial para polarizar el árbol. La anchura mínima de esta zona de transición depende de la intensidad efectiva de los imanes polarizantes y de la fuerza coercitiva del material de árbol, que disminuye cuando aumenta la primera y aumenta cuando aumenta la segunda. La anchura óptima de la zona de transición va a depender del tipo, tamaño y orientación del sensor o sensores de campo usados para detectar el campo que depende del par. En el caso de que se desee obtener una zona de transición más estrecha que la que se puede obtener con los imanes polarizantes 1 y 2 cuando están en sus posiciones paralelas, un desplazamiento angular alrededor del eje del árbol, de un imán con respecto al otro, va a proporcionar la separación necesaria para reducir su interacción mutuamente debilitante. En la figura 3, se ilustra la máxima separación de 180° por motivos de conveniencia. En vez de estar el imán 2 al lado del imán 1, ahora está girado hasta la posición que se ilustra en líneas discontinuas y que se indica como imán 2'. También sería posible imanar una zona cada vez, es decir, girar el árbol sólo con el imán 1 en su lugar, después retirar el imán 1 y girar el árbol con el imán 2 en su lugar. En todos los esquemas que usan imanes permanentes, es necesario apartar los imanes de sus posiciones cercanas al árbol (como alternativa, se puede deslizar una "armadura magnética" entre los polos de cada uno) antes de que termine el giro del árbol. Se pueden usar de manera conveniente electroimanes para polarizar ya que se puede ajustar su "intensidad" y éstos pueden "desconectarse" de manera efectiva sin movimiento físico de los imanes o de las armaduras magnéticas.

En la figura 4 se muestra un ejemplo de la dependencia del funcionamiento del transductor de par (medido mediante la sensibilidad, es decir, campo por par unitario) sobre la "intensidad" de los imanes polarizantes (medida mediante la fuerza magnetomotriz (mmf) y la reluctancia de circuito magnético). En esta figura se puede apreciar directamente la completa ausencia de un campo dependiente del par para corrientes imanantes por debajo de aproximadamente 1,5 A. Esto demuestra que el campo efectivo tiene que alcanzar una intensidad crítica antes de que el material de árbol desarrolle cualquier remanencia circunferencial significativa. Esta intensidad crítica está relacionada con la fuerza coercitiva del material de árbol ya que la intensidad de los lóbulos de campo inverso debe aproximarse a la coercitividad del material de árbol, en este caso 44 Oe, para desarrollar una remanencia significativa. Dicho de otro modo, el campo debe obtener suficiente intensidad para una "propagación" a gran escala de las paredes de dominio. A medida que la corriente imanante aumenta por encima de un valor umbral (en este caso por encima de 1,5 A), se ve que la sensibilidad aumenta continuamente. Aunque el aumento de sensibilidad a medida que aumenta la corriente es rápido al principio, pronto disminuye, mostrando signos de alcanzar al final un valor máximo. Un examen de los puntos de datos en 12 y 15 A con espacio cero entre los imanes y el árbol, muestra que la saturación anticipada de la sensibilidad que se puede obtener con el hueco de 0,25 mm es más una estrategia del aparato que de la saturación verdadera de la remanencia de árbol. Estos dos puntos de datos ilustran la dificultad de obtener un valor saturado de sensibilidad y la importancia de minimizar la reluctancia en el circuito imanante. La función de transferencia que se muestra aquí es el resultado combinado de las siguientes propiedades y fenómenos:

1. el crecimiento en el campo coercitivo con imanación máxima;
2. la fuerza coercitiva del material de árbol;
3. la penetración radialmente hacia dentro de la amplitud de campo crítico con mmf;
4. la disminución del esfuerzo cortante lejos de la superficie;
5. la disminución de la imanación axial lejos de la superficie;
6. la disminución del campo por par unitario lejos de estas zonas internas;
7. el aumento de la distancia del sensor de campo desde fuentes de campo incluso más internas;
8. la reducción de anchura de la zona de transición a medida que aumenta la intensidad de campo polarizante;
9. la no linealidad (saturación) del campo polarizante con corriente cada vez mayor.

Una vez creada una zona activa mediante polarización o polarizaciones circunferenciales locales, el árbol puede identificarse de manera adecuada como un transductor de par. La zona activa está preferiblemente formada por polarizaciones duales. Aunque en realizaciones normales, la inclinación de la imanación remanente que resulta de la aplicación del par se detecta mediante un dispositivo próximo responsable de la intensidad de algún componente del campo magnético que resulta de tal inclinación de imanación, también se pueden detectar cambios en el componente axial de la imanación remanente asociada con tal inclinación mediante el voltaje (emf) inducido en una bobina que rodea el árbol y está centrado en una zona polarizada circunferencialmente. El componente axial de imanación (proporcional al par) puede recuperarse integrando el emf inducido con el tiempo. En el presente estado de la tecnología electrónica no existe ningún integrador sin variación, aunque se puede conseguir una variación pequeña en el periodo de tiempo corto - en el orden de entre varios segundos y varios minutos. Sin embargo, en aplicaciones en las que el par que nos interesa sólo existe durante cortos periodos de tiempo, por ejemplo, en herramientas de pulsiones y de impulsos, este es un dispositivo de detección viable, en concreto en estructuras que tienen sólo una única polarización en la zona activa.

ES 2 301 211 T3

La figura 5 ilustra el modo en el que la intensidad de campo radial correspondiente (surge con la aplicación de par) varía según la posición axial en la zona activa de un árbol polarizado con la polarización en la sensibilidad más alta que se puede obtener mostrada en la figura 4. La forma normal de esta distribución de campo concuerda con el campo aproximadamente cuadrupolar que se espera de dos zonas adyacentes con imanaciones axiales directamente opuestas. Por ejemplo, esta es la forma de la distribución de campo que se vería en el espacio que rodea dos imanes rectos coaxiales colocados con polos similares en contacto. Un examen detallado de esta figura muestra características que reflejan tanto la distribución física del aparato polarizante como las propiedades magnéticas del material de árbol. Por ejemplo, se puede observar que el pico central es en realidad dos picos con un pequeño valle entre medias. Este es el tipo de distribución de campo que uno espera de dos imanes rectos si sus polos similares están algo separados. Es, por tanto, una clara indicación de la presencia de una zona de transición con una anchura significativa. La desigualdad de altura de los dos picos probablemente representa pequeñas diferencias en los dos imanes polarizantes. Como puede verse en la figura 4, pequeños cambios de distancia entre los trozos de polo magnético y el árbol pueden afectar de manera significativa a la sensibilidad. Una pequeña falta de paralelismo entre las superficies de imán y el árbol evitaría que los dos imanes usados para obtener estos datos estuvieran exactamente a la misma distancia del árbol o tuvieran toda su anchura rozando el árbol. Como la anchura del espacio que hay entre los imanes usados para obtener estos datos es de 2,5 mm, más o menos la misma que la separación axial de los picos, la anchura correspondiente de la zona de transición y la separación de los imanes que se indica en la figura 3 (en donde la zona de transición es más estrecha que la separación entre imanes) no es claramente un resultado normal. Con lo que ya se ha descrito, debe quedar claro que la zona de transición puede ser más ancha que esta separación. Por otro lado, cuando nos damos cuenta de que la distancia entre los picos más pequeños (polaridad inversa) que es inferior a ± 15 mm cubre toda la dimensión de los imanes de 27,5 mm, debe quedar claro que para imanes muy separados (en donde la zona polarizada va a cubrir la anchura de los imanes por ambos extremos), es posible que la zona de transición sea más estrecha que la separación entre imanes. Con esta interpretación del proceso de polarización, ahora puede apreciarse la ayuda del punto 8, anterior, a la lenta aproximación a un valor saturado de sensibilidad. Un sensor de campo situado en el centro geométrico del espacio que hay entre los imanes va a indicar un aumento de sensibilidad a medida que disminuye la profundidad del valle que hay entre los picos.

Los picos duales y la simetría imperfecta de la curva que se muestra en la figura 5, representan únicamente un resultado experimental. En algunas aplicaciones puede ser conveniente tener un único pico central afilado, mientras que en otras aplicaciones, sería conveniente un pico central relativamente plano y redondeado (por ejemplo para reducir la variación de sensibilidad al “movimiento” axial por el árbol). En general, y también para simplificar las explicaciones del dispositivo, sería preferible una curva simétrica con un solo pico central. Por otro lado, puede haber aplicaciones específicas en las que se podrían distribuir de manera ventajosa dos, varias o más zonas polarizadas individuales por un árbol. En efecto, tal árbol contendría más de una zona activa, teniendo para varios fines especiales, las mismas polarizaciones circunferenciales o directamente contrarias. Las características distintivas de tales distribuciones múltiples de zona son que los campos que provienen de cada una de tales zonas son, en un espacio próximo, independientes entre sí. Un trazado tal como el que se muestra en la figura 5 muestra entonces picos positivos y negativos simétricos (de igual amplitud) en los extremos de cada zona polarizada o cerca de los mismos. Debe quedar claro que, en transductores con más de una zona polarizada, es la anchura de la zona de transición la que establece la diferencia de características de las zonas activas como zonas polarizadas múltiples individuales o individuales múltiples.

Una cuestión relacionada que hay que tratar brevemente es la influencia de la extensión axial de la zona activa en el funcionamiento del transductor de par. Hay que examinar las dimensiones de la zona activa desde dos puntos de vista. En primer lugar, naturalmente, está la cuestión de cuánto espacio hay disponible en el árbol para aplicar la función de detección de par. Si en una aplicación específica este espacio está estrictamente limitado, debido a la proximidad de material imanable no asociado, por ejemplo: cojinetes de bolas, engranajes, etc., esto se convierte en una cuestión fundamental. Si se dispone del espacio deseado, las dimensiones de la zona activa se van a elegir de manera normal para obtener la sensibilidad deseada (es decir, campo de la señal por par unitario). El objetivo aquí no consiste simplemente en maximizar la intensidad del campo en el valor de pico del par aplicado sino más bien consiste en obtener una intensidad de campo conforme al tipo y orientación preferidos de sensor o sensores de campo magnético (o componente de imanación axial). Un campo de señal demasiado alto no solo puede saturar algunos tipos de sensores de campo, sino que también puede imanar material ferromagnético cercano en partes de máquinas que desempeñan funciones no relacionadas con la detección de par. Como la intensidad del campo de la señal es el producto de un factor de desimanación (que disminuye según aumenta la longitud de la zona activa) y el componente axial de imanación (que aumenta según aumenta la longitud de la zona activa), la longitud de la zona activa no es un determinante de la sensibilidad de la intensidad de campo. De este modo, si se construye una familia completa de transductores de par con una amplia gama de pares que varía considerablemente (es decir, con varios diámetros de árbol), puede resultar ventajoso utilizar una zona activa con las mismas dimensiones para todos con miras a permitir usar el mismo diseño de sensor de campo con todos. Por lo que se refiere al diámetro de árbol, una gama útil de dimensiones puede ser algún múltiplo entero, por ejemplo cuatro (4) veces el diámetro para árboles pequeños en el orden de 3 mm de diámetro, una (1) vez el diámetro para árboles en el orden de 20 mm de diámetro, 0,3 veces el diámetro para árboles en el orden de 100 mm. Resultaría útil considerar que la longitud de la zona activa esté entre 5 y 100 mm para árboles con un diámetro de entre 1 y 100 mm. La extensión axial de la zona activa se determina, en la mayoría de los casos, mediante consideraciones prácticas tales como que la zona debe ser lo suficientemente grande como para desarrollar un campo prácticamente útil y debe ser medida de manera adecuada para ser detectada por sensores vectoriales magnéticos prácticamente útiles y disponibles comercialmente. En el caso de que los extremos efectivos de tales zonas se hagan a propósito para su difusión, las “dimensiones” de la zona activa llegan a ser aún menores que las de un ejemplar. La conveniencia de diseño es el factor principal para determinar las dimensiones y

ES 2 301 211 T3

el emplazamiento o emplazamientos axiales de la zona o zonas activas. En general, va a ser preferible colocar zonas activas en áreas del árbol que estén suficientemente alejadas de sus extremos para no verse afectadas por imanaciones procedentes del medio ambiente, fuentes de campo magnético secundarias o imprevistas.

5 Como ya se ha indicado, es necesario que el árbol tenga una combinación adecuada de propiedades mecánicas, magnéticas y magnetoelásticas para que pueda funcionar como un transductor de par sin aro. Combinaciones adecuadas de propiedades se encuentran en muchos aceros normalmente disponibles. Varias aleaciones de “imán permanente” que también poseen combinaciones adecuadas de resistencia y ductilidad también son adecuadas, aunque su limitada disponibilidad comercial y su coste relativamente alto van a restringir su uso en aplicaciones especiales. Obtener la
10 combinación necesaria de propiedades mecánicas y magnéticas es tanto una función del estado metalúrgico como de la composición química; por tanto el material de árbol elegido se va a someter casi con toda seguridad a alguna forma de tratamiento térmico (y/o tratamiento mecánico). Este consiste a menudo en un calentamiento hasta una temperatura adecuada y en un enfriamiento a una velocidad controlada (por ejemplo, templado en aire, aceite o agua) seguido de un recalentamiento a una temperatura inferior y a un enfriamiento mucho más lento (templado - también “normalización
15 térmica” para precipitar compuestos intermetálicos). Se puede confirmar que los procesos criogénicos son adecuados para optimizar y/o estabilizar las propiedades obtenidas. En cualquier caso, el objetivo de todos estos tratamientos es reforzar al mismo tiempo el material mecánicamente (elevar su límite elástico) y “endurecerlo” magnéticamente (elevar su fuerza coercitiva). En general, se va a ver que el material en su estado final debe tener una fuerza coercitiva (H_c) preferentemente superior a 1,2 KA/m (15 Oe), más preferiblemente superior a 1,6 KA/m (20 Oe), de manera más deseable superior a 2,8 KA/m (35 Oe), y de manera ideal, superior (cuando se mide en la dirección de ese campo) a la mayor intensidad de campo magnético que se va a producir con la aplicación del máximo par esperado.

A continuación, se muestran ejemplos de categorías de materiales que se han encontrado adecuados para transductores de par sin aro. Se indican grados típicos en cada categoría.

- 25
1. Aceros Inoxidables Martensíticos (de preferencia templados al aire) Grados AISI/SAR: 403, 410, 414, 416, 420, 431, 440A, 440B, 440C
 - 30 2. Aceros Inoxidables Templados Mediante Precipitación (que contienen cromo y níquel)
Grados AISI/SAR: 15-5PH, 17-4PH, 15-5PH, 17-7PH, PH 13-8Mo
 - 35 3. Aceros Aleados (enfriados y templados - a veces cementados o nitrurados)
Grados AISI/SAR: 4140, 4320, 4330, 4340, 4820, 9310
Denominaciones típicas: 300M, Aermet 100, 98BV40, 9-4-20, 9-4-30
 - 40 4. Aceros para Herramientas (de preferencia aceros hiperealeados “limpios” enfriados y templados)
Grados AISI/SAR: A, D, H, L, M, O, T, W y aceros para herramientas con alto contenido de cobalto y de gran velocidad.
 - 45 5. Aceros Maragin (con alto contenido de níquel y bajo contenido de carbono)
Denominaciones típicas: 18 Ni 250, C-250, Vascomax T-300, NiMark, Marvac 736
 - 50 6. Materiales para Imanes Permanentes
Denominaciones típicas: Vicalloy, remendar, Cínife, Cunico, Vacozet
 - 55 7. Aceros para Imanes
Denominaciones típicas: Acero KS, Acero MT, 3,6% Cr, 15% Co, Acero de Tungsteno
 - 60 8. Aleaciones Especializadas y Otros Materiales
Denominaciones típicas: Permendur, Alfer, Alfenol, Kovar, Níquel Estirado en Frío, Permaloy Estirado en Frío.
 - 65

ES 2 301 211 T3

El funcionamiento que se puede obtener actualmente en los transductores de par sin aro es muy inferior al que se puede obtener con anillo en estructuras de árbol. La histéresis en la función de transferencia es la causa principal del funcionamiento imperfecto. Sin embargo, el funcionamiento que se puede obtener actualmente es absolutamente satisfactorio para muchas aplicaciones. Además, como se ha observado una amplia gama de histéresis (diferentes materiales, termotratamientos variados); incluidos tanto valores positivos como negativos, queda claro que el funcionamiento se va a mejorar con más avances. La función de transferencia de un transductor de par sin aro experimental hecho con el mismo tipo y tamaño de material de Acero de Gran Velocidad como se usaba para obtener los datos que se muestran en las figuras 4 y 5, se muestra en la figura 6. Aparte de esto, para la presencia obvia de histéresis, se puede ver que la función de transferencia de este transductor muestra una linealidad excelente. No se vieron cambios significativos en la línea de regresión cuando la carga se aumentó a ± 50 N-m. La función de transferencia de otros transductores experimentales (normalmente hechos con materiales que tienen coercitividades bajas) mostró altos valores de histéresis y signos de saturación (pendientes cada vez menores en los niveles de par más altos).

Se ha dejado claro a lo largo de la descripción de la presente invención que es conveniente suprimir completamente o al menos minimizar la presencia de material imanable permeable cerca de la zona activa del transductor. En el anillo de sensores de árbol de la patente U.S. 5.351.555, esto se realiza normalmente usando árboles de material de baja permeabilidad o mediante separación espacial, por ejemplo, mediante un manguito de baja permeabilidad intermedio, del "anillo" desde un árbol que tenga una permeabilidad más alta que la deseada. Con diseños sin aro, la baja permeabilidad deseada de material próximo se realiza usando materiales de árbol que tengan coercitividades relativamente altas, a veces junto con un aislamiento geométrico de la zona activa de partes de árbol contiguas. La característica principal de estructuras sin aro satisfactorias es que la magnitud del campo creado por el par es demasiado pequeña para producir cambios de imanación irreversibles significativos en zonas del árbol próximas a la zona activa.

Otro requisito práctico para transductores de par imanados circularmente es que una o más zonas activas tengan cada una emplazamientos identificables en el árbol y extensiones axiales efectivas más cortas que toda la longitud del árbol. En el anillo de los sensores de árbol de la patente U.S. 5.351.555, las dimensiones físicas del anillo limitan la extensión axial de la zona activa y, como la zona o zonas activas se limitan a quedar situadas dentro de las dimensiones del anillo, el emplazamiento del anillo establece automáticamente su posición en el árbol. En diseños sin aro, tanto la extensión axial como el emplazamiento axial de la zona o zonas activas se establecen como detalles de las imanaciones remanentes circunferenciales implantadas, con o sin características geométricas coordinadas.

Aún hay otra estructura de sensores de par sin aro que impide sustancialmente el desarrollo de campos parasitarios en material de árbol próximo a la zona activa. De acuerdo con esta estructura, se impide la presencia de material imanable cerca de la zona o zonas activas y se establece una zona o varias zonas activas y emplazamientos fijos utilizando las únicas propiedades de determinados materiales de árbol seleccionados. Pueden existir materiales adecuados en una de dos (o más) fases metalúrgicas estables diferentes, (por encima de la gama de temperaturas funcionales del transductor). Una de tales fases va a ser suficientemente ferromagnética y magnetoestrictiva para cumplir los requisitos de las zonas activas y otra va a tener una permeabilidad suficientemente baja para ser no imanable de manera efectiva y, por tanto, para cumplir sustancialmente los requisitos de zona pasiva. El término "sustancialmente pasivo" según se usa aquí significa zonas que, cuando se someten a campos magnéticos, no se iman de manera suficiente como para originar campos magnéticos parasitarios con suficiente intensidad para destruir la utilidad, con fines de detección de par, del campo magnético puro visto por los sensores de campo magnético. Si estas fases se pueden establecer a voluntad mediante procesamiento adecuado, debe quedar claro que las zonas activas y las zonas sustancialmente pasivas, cada una con el tamaño y el emplazamiento deseados, pueden hacerse para que coexistan en el mismo árbol. Un transductor de par se crea después simplemente introduciendo partes adecuadas de una imanación remanente circunferencial (es decir, mediante polarización) de la zona o zonas activas en el sentido o sentidos circulares deseados. Naturalmente, es conveniente que la anisotropía que mantiene estas polarizaciones limite la imanación remanente para que quede dentro de los 45° de la dirección circunferencial. La anisotropía uniaxial, tal como la que se introduce en los anillos del anillo de los sensores de árbol, en esta dirección es obviamente más conveniente. También es conveniente la anisotropía magnetocristalina asociada con las instalaciones atómicas de una estructura de celosía que posee simetría multiaxial, por ejemplo una estructura cúbica con una estructura cristalina bcc, que caracteriza los materiales de árbol seleccionados para estructuras de sensor sin aro. A pesar de que la zona activa va a estar, de manera conveniente, flanqueada sustancialmente por las zonas activas, es importante que la coercitividad de la zona activa permanezca alta. Esto es para impedir que el campo que se crea como resultado del par aplicado cree una pérdida irreversible de magnitud de polarización circunferencial en la zona activa. Al igual que en la realización anterior de la presente invención, una coercitividad superior a 15 es conveniente, superior a 20 es particularmente conveniente y superior a 35 es preferible. La estructura básica de un árbol procesado metalúrgicamente para usar como un transductor de par se muestra en relación al sensor de la figura 7 que ilustra un árbol en una sola pieza procesado para tener una zona ferromagnética magnetoestrictiva aislada (La Zona Activa Imanable) con una dimensión y una posición axiales. Aunque el árbol es físicamente de una sola pieza y normalmente tiene una composición química homogénea completa, está formado por zonas activas separadas y sustancialmente pasivas teniendo cada una propiedades magnéticas adecuadas para su función correspondiente.

Pueden existir muchos materiales sólidos en más de una forma estructural, es una característica denominada polimorfismo. Cada forma polimórfica (o alotrópica) diferente constituye una fase. La transformación de una fase a otra es un hecho común en materiales metálicos. Los cambios de fase a temperaturas características durante cada enfriamiento o calentamiento se producen en muchos metales puros y también en aleaciones. El rango de temperaturas críticas durante las que se produce la transformación varía dependiendo de la composición de los metales, desde temperaturas

ES 2 301 211 T3

cercanas al punto de fusión hasta temperaturas cercanas al cero absoluto. Algunas transformaciones de fase se producen isotérmicamente durante un periodo de tiempo, aunque la fase final concreta depende con más frecuencia de la velocidad de enfriamiento (o de calentamiento) de un rango de temperaturas críticas. En algunas aleaciones, una transformación de fase que normalmente se produce durante el enfriamiento, también puede realizarse con medios mecánicos a temperaturas muy superiores a las que se necesitan sólo para el enfriamiento. En los procesos efectivos se incluyen deformación plástica, ondas dinámicas y a veces incluso presión hidrostática simple. Transformaciones que no van a ocurrir nunca durante el enfriamiento, incluso con temperaturas cercanas al cero absoluto, se puede hacer a menudo que ocurran a temperaturas más altas con medios mecánicos. El grado de transformación que puede inducirse mediante tal labrado en frío varía según la composición, el grado de deformación y la velocidad de deformación. Las transformaciones de fase inducidas termalmente de un material que se ha labrado en frío se producen a menudo a diferentes temperaturas que en un material no deformado que tenga la misma composición. En muchas aleaciones ricas en hierro (ferrosas), las diferentes fases que son estables en el rango de temperaturas funcionales de la mayor parte de los mecanismos (entre -50°C y $+150^{\circ}\text{C}$) incluyen un espectro completo de características magnéticas. De este modo, puede existir una única aleación de manera estable en una fase ferromagnética, paramagnética (o incluso antiferromagnética) dependiendo de su historial de tratamiento térmico y de tratamiento mecánico. Es incluso posible que diferentes fases ferromagnéticas coexistentes difieran de manera significativa en sus propiedades magnéticas y magnetoelásticas respectivas. Las diferentes fases de un material también tienen muy a menudo diferentes densidades, resistividades eléctricas, módulos eléctricos y otras propiedades físicas.

Independientemente de la aleación específica usada y de si las transformaciones de fase se van a inducir únicamente mediante procesos térmicos, únicamente mediante procesos mecánicos o mediante combinaciones de ambos procesos, el procedimiento general para procesar un árbol va a implicar someter las zonas activas y sustancialmente pasivas a diferentes condiciones de procesamiento necesarias para obtener la fase específica deseada en cada una de tales zonas. De este modo, como mínimo una de las fases de procesamiento se asigna a una de estas zonas de árbol y no a la otra.

Someter una zona localizada a varios tipos de deformación mecánica se puede realizar de manera sencilla. Para algunos procesos tales como forja, estampado, moleteado, laminado superficial y equivalentes, la ubicación en el árbol y la extensión axial de la zona procesada se controlan fácilmente mediante el tamaño y la posición del herramental asociado. Las ondas dinámicas localizadas se inician fácilmente envolviendo la zona o zonas deseadas del árbol con explosivos adecuados. Se puede localizar incluso la tensión o compresión axial mediante dispositivos de fijación adecuados.

Limitar varias carreras de temperatura a zonas localizadas requiere un uso juicioso de fuentes de energía focalizadas, aislamiento térmico y contacto local con superficies calentadas o enfriadas. Estas técnicas pueden usarse por separado o en combinación durante una o más fases de procesamiento. La idea básica se ilustra en el ejemplo específico que se muestra en la figura 8 que ilustra un árbol calentado con el paso de una corriente eléctrica. La temperatura del árbol en la zona del bloque central “frío” se mantiene más baja que en las zonas extremas no frías.

El tamaño, forma y complejidad del bloque “frío” que se muestra en esta figura va a depender del tamaño de árbol, del gradiente de temperatura requerido entre las zonas enfriadas y no enfriadas y del tiempo durante el cual hay que mantener este gradiente. Con árboles de diámetro pequeño, o con tiempos de ciclo termal rápido, podría ser suficiente con un anillo de cobre de ajuste forzado (quizás incluso galvanizado). La alta conductividad eléctrica del cobre reduciría el calentamiento óhmico de la zona de árbol cercada. Los tiempos de proceso largos, los árboles grandes y/o los gradientes de temperatura altos podrían requerir un disipador térmico activo, por ejemplo enfriamiento por aire a presión de un bloque con aletas, o incluso un bloque enfriado con agua o refrigerante. También podría ser conveniente, para reducir la energía eléctrica necesaria de igual manera para mantener una temperatura más uniforme y de control más fácil, aislar las zonas de árbol no enfriadas con fibra de vidrio, asbestos u otros materiales con conductividades térmicas bajas. El uso de aislamiento y disipadores térmicos y su emplazamiento van a depender obviamente de si son o no las zonas pasivas del árbol las que requieren el tratamiento con las temperaturas más altas. Además del procedimiento que se ilustra en la figura 8, también se pueden usar otros medios de calentamiento selectivos (o de enfriamiento). También se puede aplicar calentamiento por inducción, calentamiento por calor radiante, inmersión parcial en líquidos calentados o enfriados y otros medios de transferencia de energía a zonas de árbol localizadas.

Como la eficacia de la deformación plástica al inducir transformaciones de fase depende de la temperatura, las zonas de transformación localizadas van a aparecer simplemente manteniendo diferentes partes del árbol a diferentes temperaturas mientras todo el árbol se somete a una deformación plástica más o menos uniforme. En materiales que experimentan transformaciones de fase producidas por deformación, existe una temperatura (normalmente denominada M_d) por encima de la cual no se produce ninguna transformación producida por deformación. Si la gama temperaturas funcionales del transductor de par está por encima de la temperatura con la que el material deformado experimentaría una transformación de fase térmicamente inducida (denominada M_s), las dos fases creadas por tal procesamiento termomecánico van a ser estables. La elección del proceso o procesos de entre los diferentes medios térmicos, mecánicos y termomecánicos para inducir transformaciones de fase va a depender claramente de las peculiaridades de cada sistema de aleación.

Para ser útil como transductor de par, un material candidato debe tener una fase estable con una remanencia, una magnetoestricción y una coercitividad adecuadas y otra fase estable que no sea más que débilmente ferromagnética con una magnetoestricción baja (dentro de la variedad de campos magnéticos a la que puede exponerse). Afortunadamente, existen varios sistemas de aleaciones muy conocidos que tienen tales fases magnéticamente diferentes dentro

ES 2 301 211 T3

la gama de temperaturas que nos interesan. Por ejemplo, se ha descubierto que aceros maraging con un 18% de níquel pueden procesarse térmicamente en varias condiciones metalúrgicas con propiedades magnetoelásticas y magnéticas sustancialmente diferentes. En general, vamos a encontrar que muchos materiales ricos en hierro hiperaleados se pueden procesar térmicamente y/o mecánicamente en condiciones que tienen propiedades magnéticas y magnetoelásticas suficientemente diferentes que van a ser potencialmente útiles para construir transductores en una sola pieza. Algunos ejemplos de sistemas de aleación útiles conocidos son los siguientes:

1. Acero Hadfield y variantes del mismo que dependen de grandes adiciones de Mn (o algunos otros elementos o combinaciones de elementos) en aceros al carbono para estabilizar la fase γ austenítica (que normalmente existe con temperaturas altas) dejando que exista a temperaturas bajas. La austenita es normalmente paramagnética. Con temperaturas criogénicas, algunas austenitas son antiferromagnéticas. El acero Hadfield consiste en hierro aleado con 12% Mn, 1,2% C. La transformación de austenita a martensita ferromagnética se realiza mediante labrado en frío a temperatura ambiente. Se puede usar laminado superficial y otros procesos que produzcan deformación local para crear una superficie activa (la profundidad depende del proceso) contigua a zonas pasivas no imanables. Con respecto a esto, es interesante apreciar que el acero Hadfield se ha usado durante más de un siglo para raíles de vías férreas donde se obtenía martensita dura resistente al desgaste por la acción de rodadura de las ruedas del tren.
2. Aceros TRIP. Estos aceros se trabajan normalmente en caliente (se deforman plásticamente por encima de la temperatura M_d) para crear una alta densidad de dislocaciones. La estructura austenítica se mantiene a temperatura ambiente (e inferior). Cualquier otra deformación plástica por debajo de la temperatura M_d da como resultado la transformación a martensita. Los aceros TRIP son aleaciones normalmente complejas, que contienen a menudo más del 30% de elementos diferentes al hierro. Como estos elementos (normalmente Cr, Co, Ni, Mo) contribuyen normalmente a la magnetoestricción (y a menudo reducen la anisotropía cristalina) estas aleaciones tienen actividad magnetoelástica. Además, habiéndose desarrollado para un servicio tan exigente como es poner en tierra chapas de piso de tanques resistentes a las minas, son excepcionalmente duros.
3. Aceros inoxidables comunes de variedad 18-18 (18% Cr, 8% Ni) que tienen una estructura cristalina austenítica en el estado recocido por solubilización. Dependiendo del contenido exacto de aleación, la estructura cristalina de muchos de los aceros de esta familia va a convertirse en martensita ferromagnética mediante tratamiento criogénico, mediante labrado en frío o mediante combinaciones de estos procesos. Normalmente aquellas aleaciones con menos contenido total de aleación (por ejemplo, AISI 302) van a transformarse más fácilmente en martensita que aquellas que tienen un contenido total de aleación más alto (por ejemplo, AISI 316). Algunas aleaciones de este tipo se formulan deliberadamente para que desarrollen una martensita dura resistente al desgaste mediante labrado en el exterior. Éstas se pueden aplicar en equipos de construcción y herramientas agrícolas.
4. Aceros inoxidables templados por solubilización de una fase que tienen suficiente cromo y níquel para mantener estructuras austeníticas a temperatura ambiente pueden transformarse en martensita mediante tratamientos de normalización térmica. Durante la normalización térmica, se forman precipitados que reducen la concentración de elementos “austenitizantes”.
5. Hierro, níquel y aleaciones de carbono con propiedades similares al acero Hadfield (aunque el Ni es más caro que el Mn).

Para hacer una demostración de la fabricación de un sensor de par sin aro mediante este procedimiento, se fabricaron árboles de prueba con tuberías sin costura de acero inoxidable (AISI-304 con aproximadamente 18% de cromo y 8% de níquel) que tenían un diámetro exterior de 6,35 mm. En el estado recocido en el que fueron recibidos, estos árboles eran esencialmente no ferromagnéticos (permeabilidad no superior a 1,1). Mientras estaba girando cada uno de los árboles, eran forzados entre dos rodillos de acero templado con separaciones de rodillo conocidas durante periodos de tiempo medidos. Este tratamiento sometió el material superficial a un esfuerzo de flexión alternativo periódico superior a su límite elástico. Tal deformación plástica hizo que la austenita se transformara en martensita ferromagnética (permeabilidad de entre 10 y 100). Esto crea la zona activa del transductor. Mediante el movimiento axial del árbol en correspondencia con el par de rodillos, se puede crear una zona activa con una extensión axial mayor que el ancho de la cara de los rodillos. Después de esto, se imanó circunferencialmente cada uno de los árboles próximos a un par de imanes de polarización contraria para crear un transductor de zona dual. El transductor se probó midiendo el campo radial que surgía de la zona de labrado en frío a medida que se aplicaba par en el árbol. Los resultados de la prueba indican que la sensibilidad aumenta a medida que disminuye la separación entre rodillos (cuanto menor sea la separación entre rodillos, mayor será la cantidad de labrado en frío), ver figura 9, y a medida que aumenta la duración de la rodadura (cuando mayor sea el tiempo de rodadura, mayor será la cantidad de labrado en frío), ver figura 10. Los resultados no nos sorprenden ya que cuanto más labrado en frío hay mayor es la formación de martensita.

65 Aplicabilidad industrial

Además de todas las aplicaciones normales para transductores de par, los diseños sin aro son especialmente adecuados para varias áreas de aplicación y aplicaciones específicas donde son convenientes o necesarias la flexibilidad

ES 2 301 211 T3

y la economía asociadas con su estructura en una sola pieza y/o la química común de las partes activas e inactivas del árbol. Algunas de éstas son las siguientes:

1. Árboles expuestos a ambientes corrosivos

Aceros de gran resistencia tales como aceros maraging con un 18% de níquel se someten a fisuración por corrosión bajo tensión cuando se someten a esfuerzos bajo tensión y se exponen a agua salada, en concreto agua salada acidificada y caliente. En transductores de “anillo sobre árbol” convencionales, el anillo instalado está a menudo bajo una tensión circunferencial de tracción sustancial como resultado de su unión al árbol mediante ajuste con apriete. Los diseños sin aro no tienen anillo, por tanto no hay zonas del árbol que se sometan intencionadamente a esfuerzos bajo tensión.

De hecho, no es insólito, con miras a aumentar la resistencia a la fatiga, granallar, laminar o tratar de otra forma las superficies de árboles de gran resistencia para infundir esfuerzos de compresión residuales. La única química de las zonas activas e inactivas también impide que aparezca corrosión galvánica cuando metales diferentes que están en contacto eléctrico se exponen a electrolitos.

2. Árboles que incluyen pares extremos

El par restrictivo de anillo en estructuras de árbol depende a menudo de la iniciación del deslizamiento interfacial entre el anillo y el árbol subyacente. El uso de árboles de acero de gran resistencia en una sola pieza impide que se produzca tal deslizamiento.

3. Árboles que funcionan con temperaturas altas o bajas o con diferentes temperaturas extremas

El uso de árboles en una sola pieza evita preocuparse por la relajación de la presión de contacto (y de la tensión circunferencial asociada) con temperaturas bajas debido a dilataciones térmicas diferenciales (contracciones) del anillo y el árbol subyacente. Igualmente, evita preocuparse por la relajación de la presión de contacto con temperaturas muy altas debido a la termodeformación (deformación inelástica asociada con la reducción de límite elástico del árbol y el anillo y el aumento de interferencia debido a diferencias en sus dilataciones térmicas).

4. Árboles que se desmontan o sustituyen constantemente por otros. (Árboles desechables)

La torsión es a menudo el principal modo de carga en herramientas de corte tales como taladradoras, machos de roscar, máquinas de escariar, fresas universales, barras de mandrilar, etc. Las herramientas de este tipo se utilizan en cualquiera de los dos modos siguientes: girando la herramienta o girando la pieza que se trabaja en la máquina. En cualquier caso, el par que se transmite a través de tales herramientas proporciona una indicación de su estado (calidad de corte, integridad, etc), de las propiedades correspondientes de la pieza que se trabaja en la máquina y de las condiciones de funcionamiento (dureza, presencia, presencia y eficacia refrigerantes, lubricantes, presencia de virutas de atascamiento rizadas, etc.). Muchas herramientas de corte se fabrican a partir de aceros para herramientas de gran velocidad, un material altamente satisfactorio para árboles de transductores de par sin aro. Únicamente es necesario crear una zona activa en alguna parte de espiga disponible (expuesta) (entre el portabrocas y otro medio de accionamiento o sostén y la zona de corte) y montar de manera adecuada un sensor de campo magnético adecuado. Podemos imaginar un sistema en el que se polarizan herramientas por separado en algún portapiezas adecuado antes de instalarlas en la máquina. La polarización se puede producir inmediatamente antes de tal instalación o en otro momento adecuado de su fabricación, afilado o reafilado. En aplicaciones en las que la herramienta gira, también es posible incluir imanes polarizantes dentro del conjunto de detección de campo, permitiendo así el uso de herramientas que no tengan tratamiento magnético anterior. Como durante el uso de estas herramientas se producen virutas, se deben hacer algunos ajustes para impedir que invadan el conjunto de detección. Las estructuras de anillo sobre árbol apenas son compatibles con la mayor parte de las aplicaciones de este tipo, siendo más adecuadas para transductores instalados en el eje (u otra parte) de la máquina herramienta. La ventaja de tener la función del transductor de par directamente sobre la herramienta de corte es que se mide automáticamente para la gama de pares usados por la herramienta real en vez de medirse para la herramienta más grande que podría usarse en la máquina.

5. Árboles “lineales” donde el par varía según el emplazamiento axial

A veces es conveniente poder medir el par que se transmite por varias partes de un árbol. Tales aplicaciones existen donde se usa un árbol para accionar una pluralidad de cargas, o donde la carga torsional se distribuye de manera continua por la longitud del árbol. Ejemplos de esto se encuentran en maquinaria de embalaje y textil donde el par motor aplicado al árbol por un lado acciona varios engranajes, poleas, ruedas dentadas, etc de varios emplazamientos separados en el espacio. Las máquinas de imprimir con papel continuo y de producción y manipulación de hojas utilizan rodillos (es decir, árboles) con distribuciones continuas (por su longitud) de aplicación de par. Cuando se permite la introducción sencilla de zonas activas en muchos emplazamientos diferentes de un único árbol, el diseño sin aro proporciona un medio fácil para monitorizar, equalizar o sino controlar la distribución de par por tales árboles. Instalar una pluralidad de anillos en un único árbol es, como poco, una tarea difícil, especialmente si todos van a tener el mismo tamaño.

ES 2 301 211 T3

6. Árboles muy pequeños o muy grandes. Árboles con extremos grandes. Maquinaria modernizada

5 Los anillos muy pequeños para usar en árboles muy grandes (por ejemplo de 1 mm de diámetro) son difíciles de manejar y de instalar usando ajustes forzados. El funcionamiento de los árboles pequeños a velocidades extremas también requiere un equilibrio preciso. Los árboles muy grandes (con cualquier diámetro y longitud) requieren máquinas grandes para manipular y posiblemente usar herramientas grandes (y caras) si el anillo se va a instalar axialmente lejos de los extremos del árbol. Bidas, cojinetes u otras secciones aumentadas que pueden existir entre el emplazamiento deseado del transductor y los extremos del árbol hacen que sea difícil o imposible utilizar anillos en estructuras de árbol. La maquinaria en obra donde la instalación de anillos (y quizás también de manguitos paramagnéticos aislantes) es demasiado elaborada, cara y/o requiere mucho tiempo, se puede modernizar con un proceso que tenga una función transductora de par simplemente montando sensores de campo en emplazamientos adecuados y polarizando la zona deseada con imanes temporales o permanentes que se mantienen en los emplazamientos necesarios a medida que gira el árbol de modo normal. Hélices de buque, árboles de laminadores, árboles de motores grandes, de generadores, de bombas y de cajas de engranajes son ejemplos.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

ES 2 301 211 T3

REIVINDICACIONES

1. Sensor de par magnetoelástico para producir una señal de salida que indica el par aplicado en un elemento alrededor de un eje del elemento que se extiende axialmente, que comprende:

una primera zona (8) con actividad magnetoelástica en dicho elemento, estando dicha zona (8) polarizada magnéticamente en una sola dirección circunferencial y poseyendo una anisotropía magnética suficiente para devolver la imanación a dicha zona (8), después de una aplicación del par en dicho elemento, en dicha única dirección circunferencial cuando el par aplicado se reduce a cero, con lo cual dicha zona con actividad magnetoelástica (8) produce un campo magnético que varía con dicho par;

un sensor de campo magnético (6) montado cerca de dicha zona con actividad magnetoelástica (8) y orientado con respecto a la misma para detectar la intensidad de campo magnético en dicho sensor y para proporcionar dicha señal de salida en respuesta a la misma;

estando como mínimo dicha zona (8) con actividad magnetoelástica de dicho elemento formada por material policristalino en donde al menos un 50% de la distribución de imanaciones locales están situadas dentro de un cuadrante de 90° dispuesto simétricamente alrededor de dicha dirección circular única y que tiene una coercitividad de al menos 1,2 kA/m (15 Oe) que es suficientemente alta para que el campo que proviene de dicha zona con actividad magnetoelástica (8) no magnetice las zonas de dicho elemento próximas a dicha zona con actividad magnetoelástica (8) para dar lugar a campos magnéticos parasitarios en los que la intensidad va a ser suficientemente grande como para destruir la utilidad, con fines de detección del par, del campo magnético puro visto por dicho sensor de campo magnético (6).

2. Sensor de par magnetoelástico según la reivindicación 1, que incluye como mínimo una zona con actividad magnetoelástica adicional (10) axialmente distinta y que se extiende en dirección circunferencial, contigua a dicha primera zona (8), estando cada zona adicional (10) polarizada en una dirección circunferencial contraria a la dirección de polarización de las zonas con polarización magnetoelástica (8) magnéticamente contiguas.

3. Sensor de par magnetoelástico según la reivindicación 1, en donde dicho elemento está formado por un material policristalino que tiene una simetría cúbica.

4. Sensor de par magnetoelástico según la reivindicación 3, en donde dicho elemento está formado por un material seleccionado del grupo que consiste en aceros inoxidable martensíticos, aceros inoxidable templados mediante precipitación que contienen cromo y níquel, aceros aleados templados y enfriados, aceros para herramientas, aceros maraging con alto contenido de níquel, materiales dúctiles para imanes permanentes, acero para imanes, Permendur, Alfer, Kovar, níquel estirado en frío y Permaloy estirado en frío.

5. Sensor de par magnetoelástico según la reivindicación 1, en donde dicho elemento es un árbol macizo alargado (12) o un árbol hueco alargado (12).

6. Sensor de par magnetoelástico según la reivindicación 1, en donde dicho elemento es un árbol alargado (12) que tiene entre sus extremos una parte que se extiende axialmente con un diámetro más grande o reducido, y en donde dicha zona con actividad magnetoelástica está formada en dicha parte con diámetro más grande o reducido.

7. Sensor de par magnetoelástico según la reivindicación 6, en donde dicha parte de diámetro reducido es un árbol separado asegurado de manera rígida en las partes extremas de diámetro más grande.

8. Sensor de par magnetoelástico según la reivindicación 1, en donde la coercitividad de dicho elemento es preferiblemente superior a 1,6 kA/m (20 Oe) y más preferiblemente superior a 2,8 kA/m (35 Oe).

9. Sensor de par magnetoelástico según la reivindicación 1, en donde dicho sensor de campo magnético (6) comprende un sensor de componentes sólidos, un sensor de efecto Hall o un magnetómetro de saturación.

10. Sensor de par magnetoelástico según la reivindicación 1, en donde en ausencia de un par aplicado en dicho elemento, dicha zona con actividad magnetoelástica (8) tiene una orientación magnética circunferencial que no tiene componente de imanación pura en dirección axial.

11. Sensor de par magnetoelástico según la reivindicación 10, en donde, cuando se aplica el par en dicho elemento, dicha zona con actividad magnetoelástica (8) tiene una orientación magnética helicoidal con componentes tanto circunferenciales como axiales, estando dicho sensor de campo magnético (6) colocado y orientado para detectar el campo magnético que proviene de dichos componentes de imanación axiales.

12. Procedimiento de detección de un par aplicado en un elemento sometido a un par y que se extiende en dirección axial, que comprende las fases de:

a) Proporcionar una primera zona con actividad magnetoelástica (8) en dicho elemento, estando dicha zona (8) polarizada magnéticamente en una sola dirección circunferencial y poseyendo una anisotropía magnética suficiente

ES 2 301 211 T3

para devolver la imanación a dicha zona, después de la aplicación del par a dicho elemento, en dicha única dirección circunferencial cuando el par aplicado se reduce a cero, estando al menos dicha zona con actividad magnetoelástica (8) de dicho elemento formada por material policristalino en donde al menos un 50% de la distribución de imanaciones locales están situadas dentro de un cuadrante de 90° dispuesto simétricamente alrededor de dicha dirección circular única y tiene una coercitividad de al menos 1,2 kA/m (15 Oe) que es suficientemente alta para que el campo que proviene de dicha zona con actividad magnetoelástica (8) no imane las zonas de dicho elemento próximas a dicha zona con actividad magnetoelástica (8) para dar lugar a campos magnéticos parasitarios en los que la intensidad va a ser suficientemente grande como para destruir la utilidad, con fines de detección del par, del campo magnético puro visto por dicho sensor de campo magnético (6);

b) generar un campo magnético como consecuencia de la aplicación del par en dicho elemento; y

c) detectar la intensidad del campo magnético en una posición próxima a dicha zona (8) con actividad magnetoelástica como una indicación de la intensidad del par aplicado en dicho elemento.

13. Procedimiento según la reivindicación 12, en donde la aplicación del par en dicho elemento hace que dicha zona con actividad magnetoelástica (8) tenga una orientación magnética helicoidal con componentes de imanación tanto circunferenciales como axiales y en donde la fase de detección comprende detectar el campo magnético que proviene de dichos componentes axiales de dicha imanación.

14. Procedimiento según la reivindicación 12, que incluye la fase de proporcionar como mínimo una zona con actividad magnetoelástica adicional (10) axialmente distinta y que se extiende en dirección circunferencial, magnéticamente contigua a dicha primera zona (8), estando cada zona adicional (10) polarizada en una dirección circunferencial contraria a la dirección de polarización de las zonas con polarización magnetoelástica (8) magnéticamente contiguas.

15. Procedimiento según la reivindicación 12, en donde dicho elemento está formado por material policristalino que tiene una simetría cúbica.

16. Procedimiento según la reivindicación 12, en donde la fase de detección se efectúa al menos en parte colocando un dispositivo detector de campo magnético (6) cerca de la zona con actividad magnetoelástica (8) y lejos de la misma.

17. Procedimiento de fabricación de un transductor de par magnetoelástico a partir de un elemento en el que se ha aplicado un par axial para generar un campo magnético que varía con dicho par, detectando la intensidad de dicho campo magnético sensores de campo magnético para proporcionar una señal de salida que indica el par aplicado, comprendiendo las fases de:

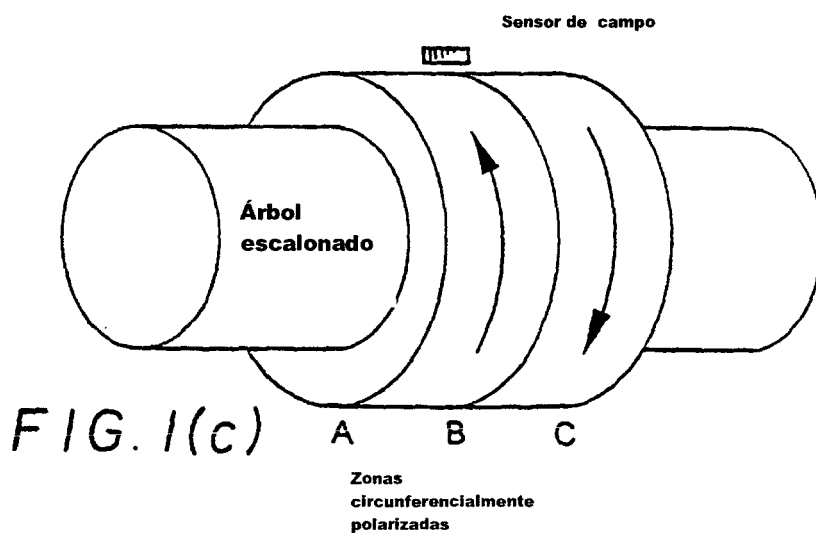
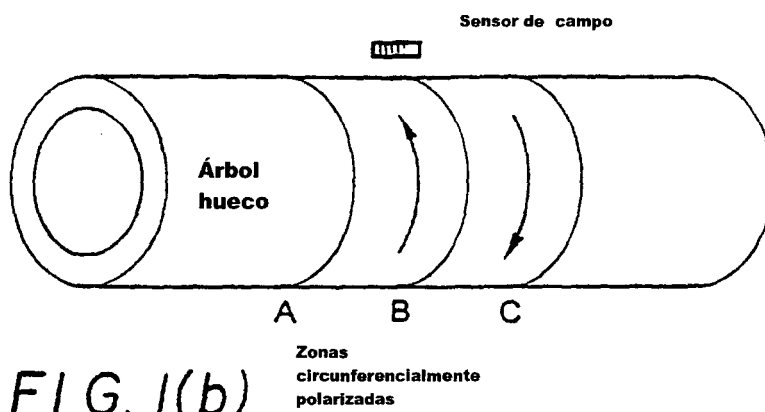
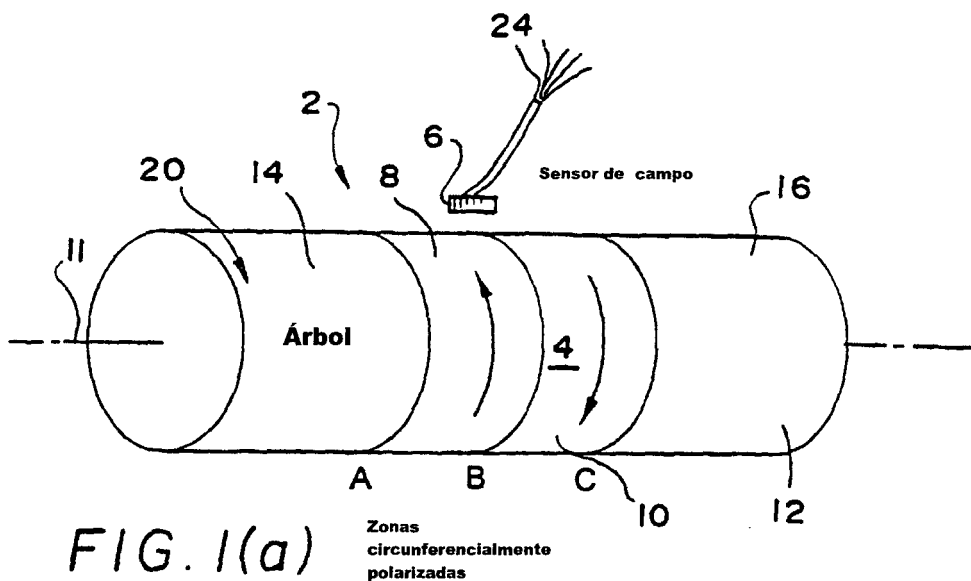
a) proporcionar un elemento ferromagnético y magnetostrictivo que tiene una primera zona con actividad magnetoelástica (8) en dicho elemento; y

b) polarizar una extensión axial limitada de dicha zona (8) en un campo magnético en una sola dirección circunferencial, poseyendo dicha zona (8) una anisotropía magnética suficiente para devolver la imanación a dicha zona (8), después de la aplicación del par a dicho elemento, en dicha única dirección circunferencial cuando el par aplicado se reduce a cero;

c) estando dicho elemento formado por material policristalino

en donde al menos un 50% de la distribución de imanaciones locales están situadas dentro de un cuadrante de 90° dispuesto simétricamente alrededor de dicha dirección circular única y tiene una coercitividad de al menos 1,2 kA/m (15 Oe) que es suficientemente alta para que el campo que proviene de dicha zona con actividad magnetoelástica (8) no imane las zonas de dicho elemento próximas a dicha zona con actividad magnetoelástica (8) para dar lugar a campos magnéticos parasitarios en los que la intensidad va a ser suficientemente grande como para destruir la utilidad, con fines de detección del par, del campo magnético puro visto por dicho sensor de campo magnético (6).

18. Procedimiento según la reivindicación 17, en donde dicho elemento tiene un eje longitudinal y dicha polarización magnética se efectúa haciendo girar dicho transductor alrededor del mismo mientras se expone a un campo magnético próximo a dos polos magnéticos opuestos.



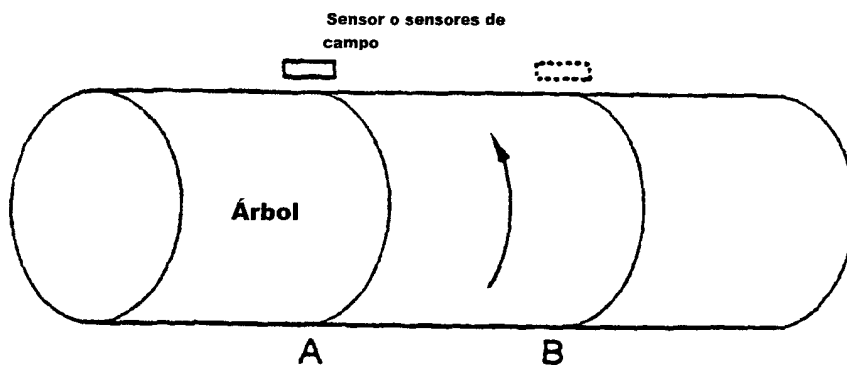


FIG. 1(d)

Zonas circunferencialmente polarizadas

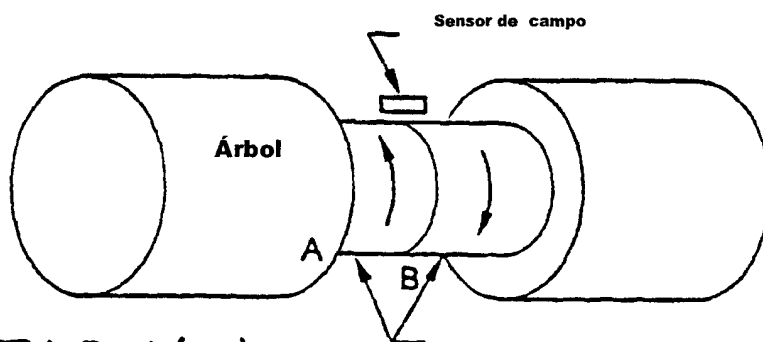


FIG. 1(e)

Zonas circunferencialmente polarizadas

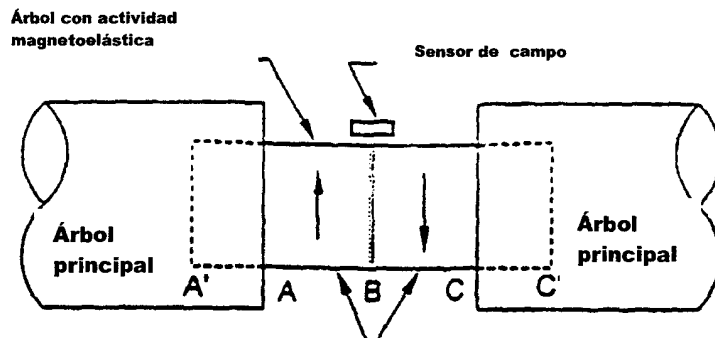


FIG. 1(f)

Zonas circunferencialmente polarizadas

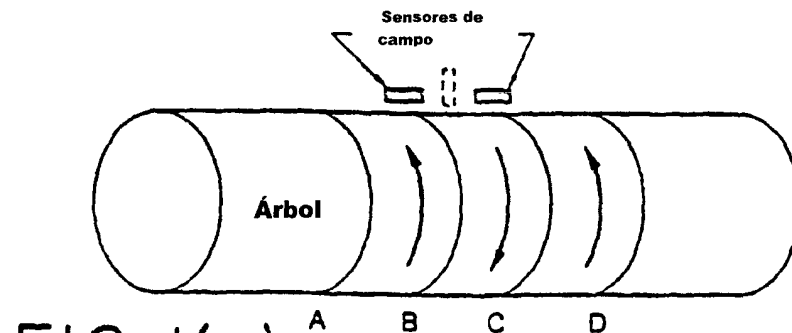


FIG. 1(g)

Zonas circunferencialmente polarizadas

**Bucle de histéresis típico M
frente a H**

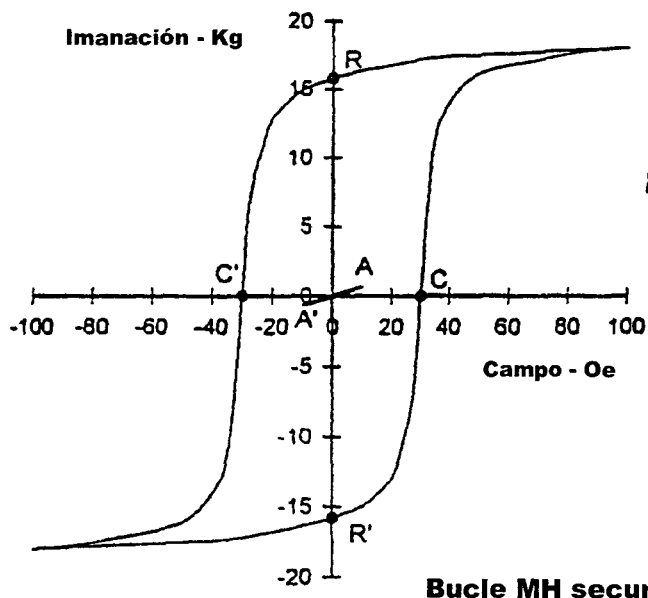
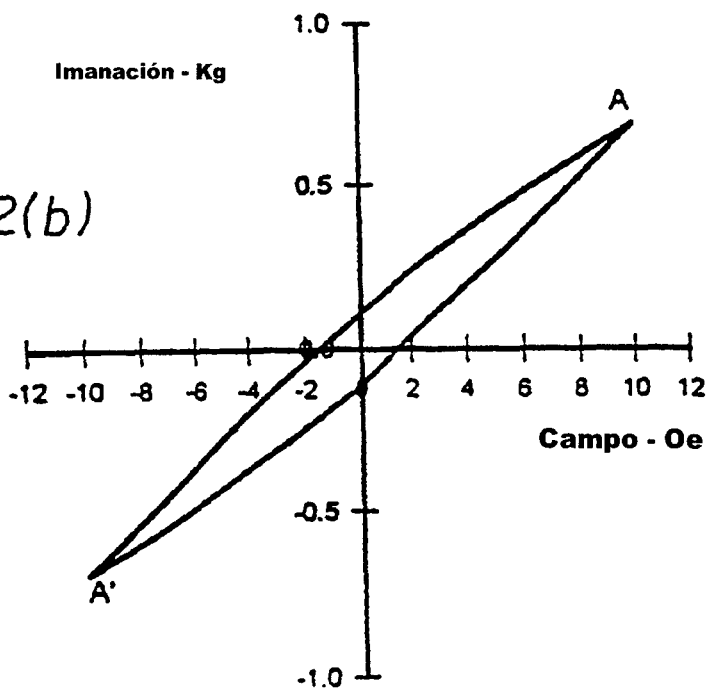


FIG. 2(b)



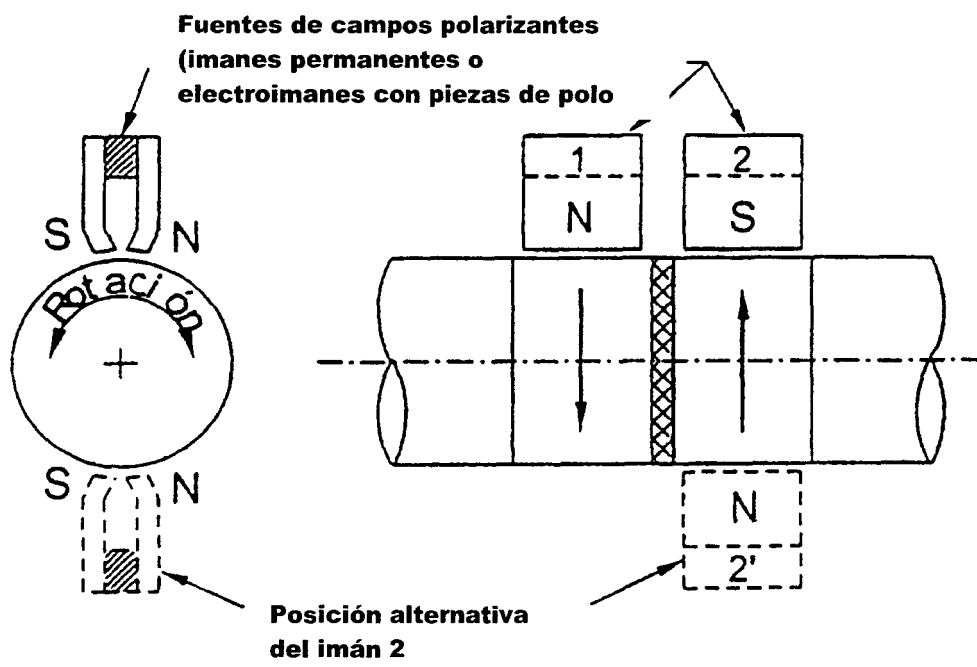


FIG. 3

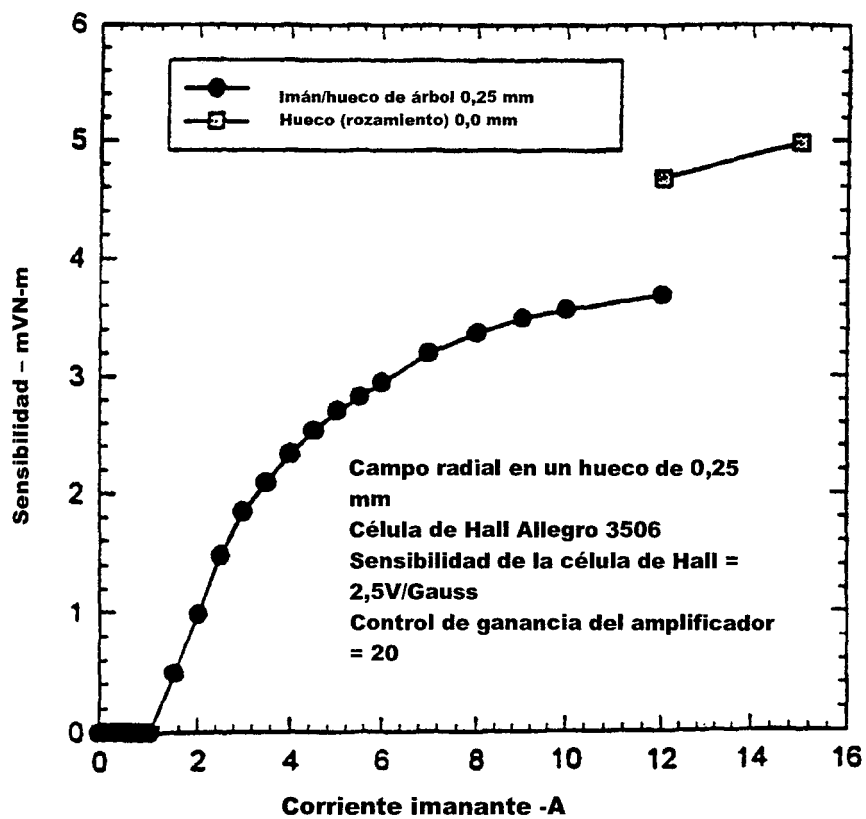


FIG. 4

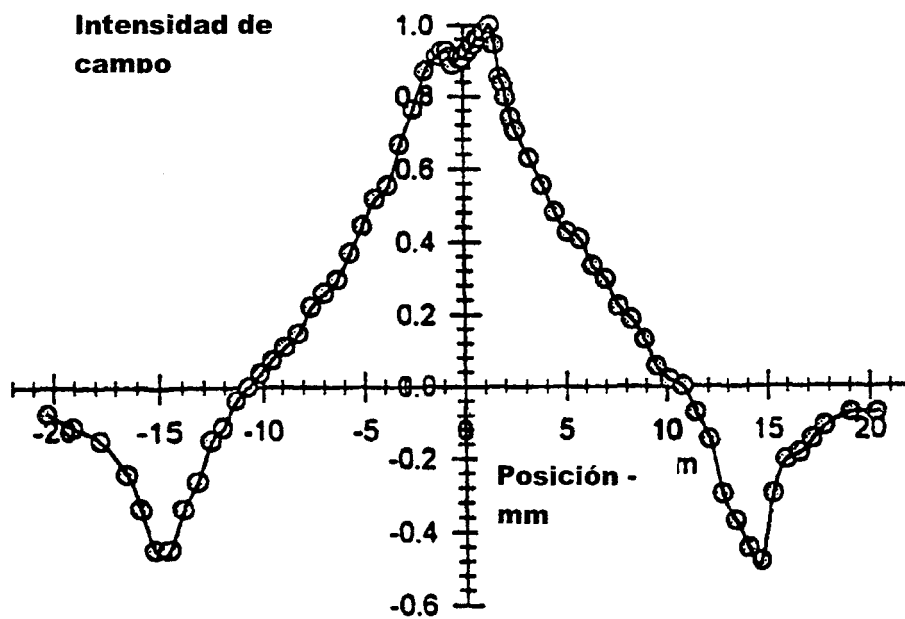


FIG. 5

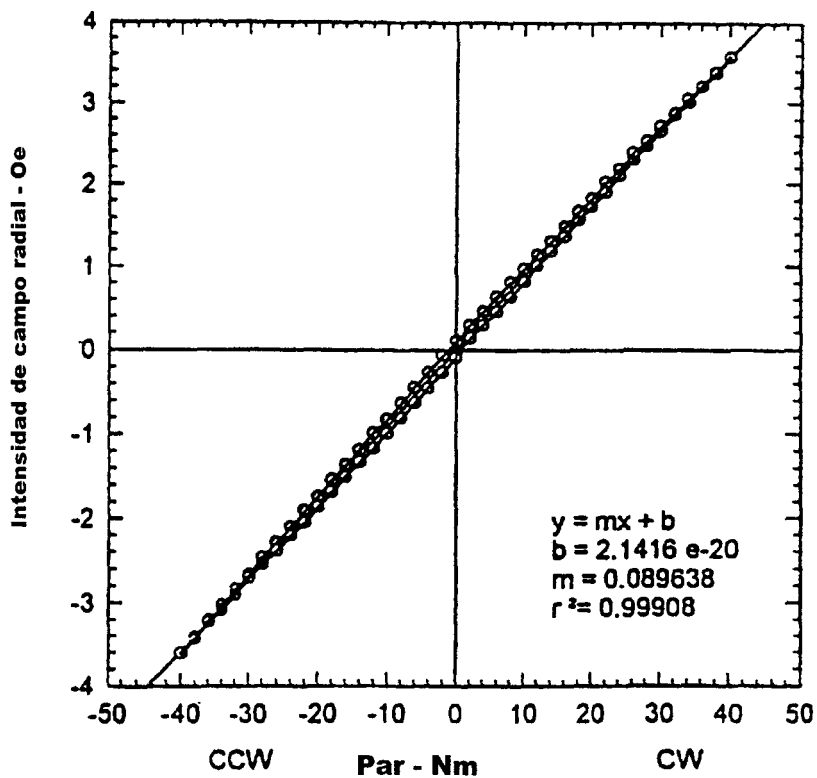


FIG. 6

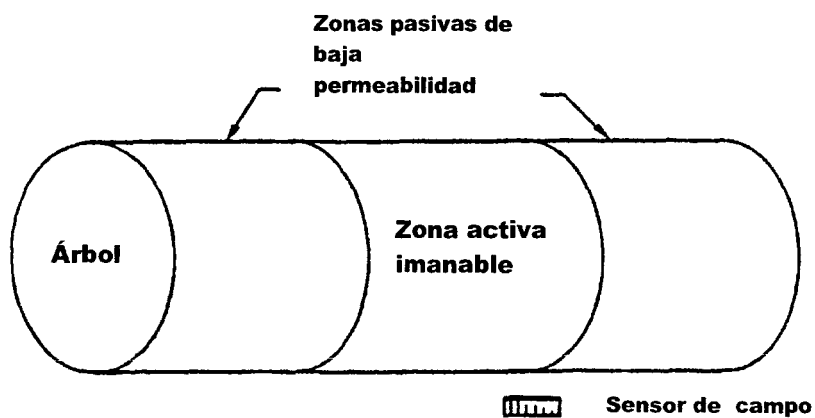


FIG. 7

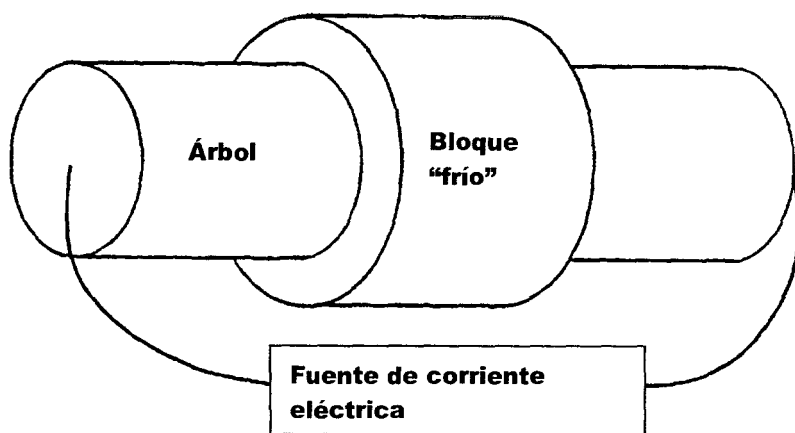


FIG. 8

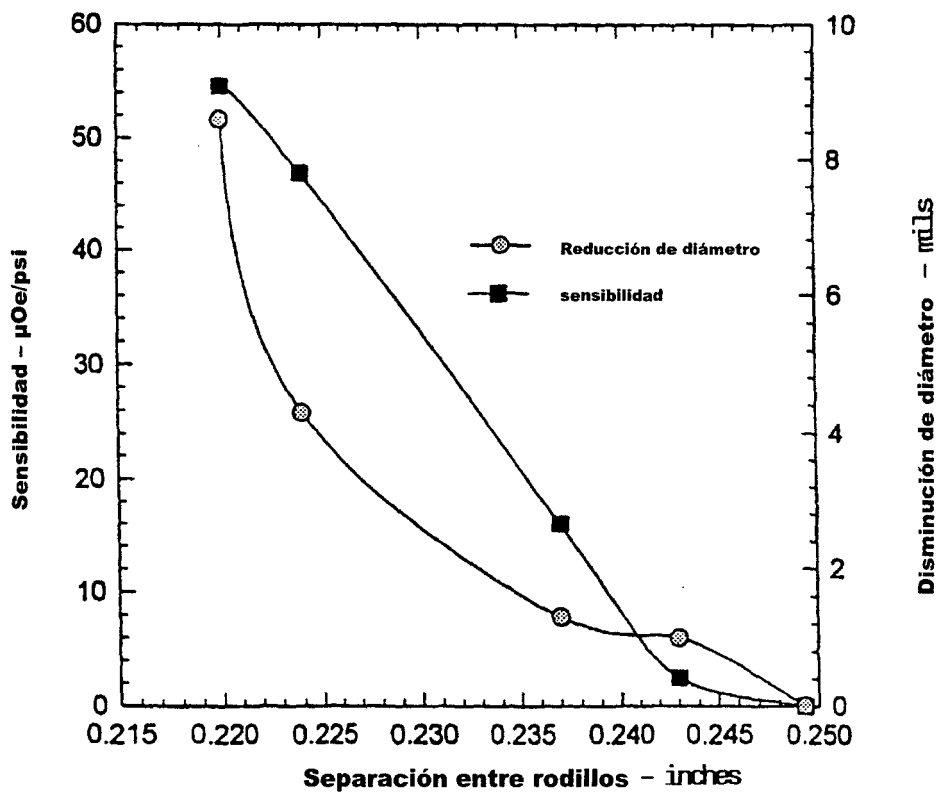


FIG. 9

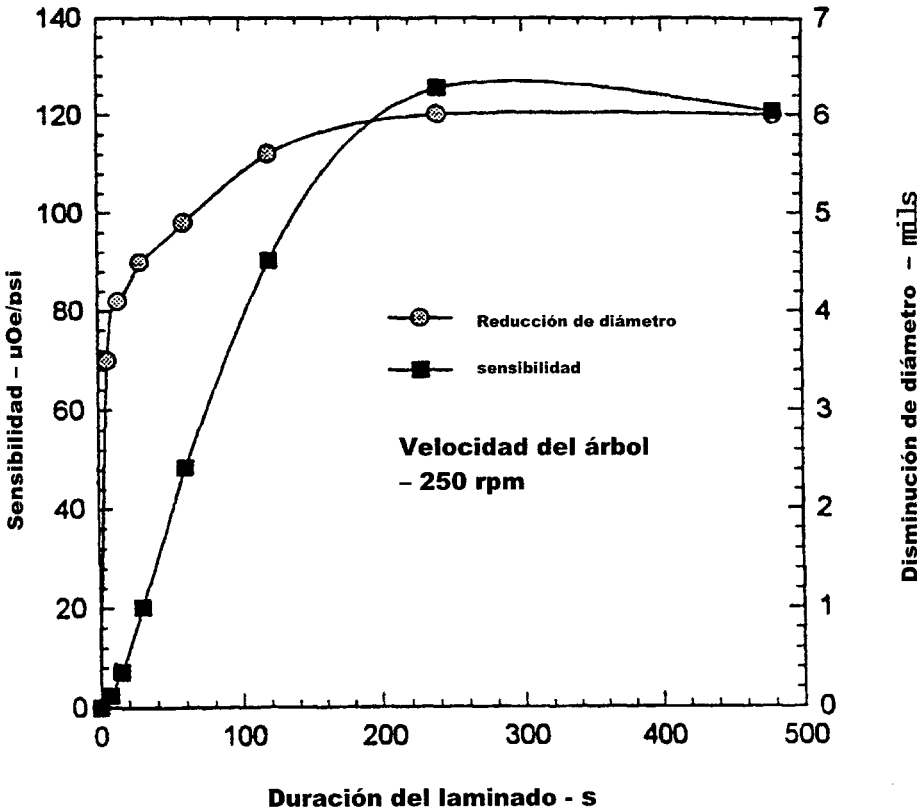


FIG. 10