

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 995 234**

51 Int. Cl.:

G01N 27/72 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.12.2020 PCT/EP2020/085093**

87 Fecha y número de publicación internacional: **17.06.2021 WO21116109**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.12.2020 E 20829196 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.08.2024 EP 4073502**

54 Título: **Procedimiento para la determinación de un valor característico de un cuerpo metálico magnetizable por medio de una disposición de sensores micromagnéticos**

30 Prioridad:
10.12.2019 DE 102019133799

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
07.02.2025

73 Titular/es:
**ROSENXT HOLDING AG (100.00%)
Obere Spichermatt 12
6370 Stans, CH**

72 Inventor/es:
**THALE, WERNER y
HÜHN, SEBASTIAN**

74 Agente/Representante:
COBO DE LA TORRE, María Victoria

Observaciones:

Véase nota informativa (Remarks, Remarques o Bemerkungen) en el folleto original publicado por la Oficina Europea de Patentes

ES 2 995 234 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para la determinación de un valor característico de un cuerpo metálico magnetizable por medio de una disposición de sensores micromagnéticos

[0001] La invención se refiere a un procedimiento para la determinación de al menos un valor característico del material de un cuerpo metálico magnetizable, en particular de una tubería de conducción, mediante una disposición de sensores micromagnéticos.

[0002] Se conocen disposiciones de sensores micromagnéticos así como su uso en el contexto de ensayos de materiales no destructivos en el aseguramiento de calidad de componentes fabricados de materiales metálicos magnetizables.

[0003] El objetivo de la presente invención es proporcionar un procedimiento que sea aplicable para la inspección en línea de tuberías y/o con el que se puedan registrar datos adicionales que permitan una mejor determinación de características de los materiales o la determinación de características del material que hasta ahora no se podían determinar mediante inspecciones micromagnéticas. El objetivo es proporcionar un procedimiento para la determinación de una característica del material mediante una disposición de sensores micromagnéticos para las inspecciones en línea de tuberías de conducción.

[0004] El objetivo se resuelve mediante un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1.

[0005] En un procedimiento para la determinación de un valor característico del material de un cuerpo metálico magnetizable mediante una disposición de sensores micromagnéticos, el cuerpo se magnetiza mediante la disposición de sensores. Para ello, se realiza una excitación de corriente o tensión de la disposición de sensores a través de al menos una bobina de excitación para la excitación de señal. La excitación de corriente o tensión incluye al menos un cambio de signo entre una parte positiva de una semionda y una parte negativa de una semionda. Aquí, la parte positiva de la semionda puede seguir a la parte negativa o viceversa. A través de la excitación de corriente o tensión, un núcleo magnético de la bobina de excitación de la disposición de sensores micromagnéticos genera un campo magnético que magnetiza el cuerpo a examinar. Se genera un campo magnético de un circuito magnético que abarca la disposición de sensores y el cuerpo, que cambia con el tiempo. A través del campo magnético cambiante del circuito magnético, se genera una señal en el receptor, que se mide. Dado que el comportamiento de todo el circuito magnético está determinado esencialmente por las propiedades del cuerpo, se pueden extraer conclusiones sobre la estructura del cuerpo a partir de la señal y, de ahí, también sobre al menos un valor característico del material del cuerpo. Para ello, la señal se somete a una Transformada de Fourier y se determina el valor característico del material correspondiente a partir de los componentes de Fourier. El procedimiento de la invención se basa en el reconocimiento de que, tras la desconexión de la excitación de la disposición de sensores, se produce una oscilación residual del circuito magnético así como de la señal generada por el campo magnético decreciente en el receptor. A partir de la disminución de la señal y de la oscilación residual tras la desconexión, se puede obtener información adicional que mejora la calidad del procedimiento para determinar un valor característico del material. El valor característico del material se puede determinar de forma mejorada o, con el procedimiento de la invención, se pueden determinar valores característicos del material que no se pueden determinar con las inspecciones micromagnéticas anteriores.

[0006] Además, la desconexión y reconexión de la excitación, con una frecuencia de excitación que es preferiblemente constante, da como resultado un amplio espectro de frecuencias, cuyas señales pueden ser evaluadas y utilizadas para determinar valores característicos del material.

[0007] Para llevar a cabo el procedimiento, además de una disposición de sensores micromagnéticos, el experto en la materia conoce en principio medios para generar la excitación de corriente o tensión con una frecuencia determinada, preferiblemente regulable, como un generador de funciones con un control correspondiente, medios correspondientes para registrar la señal generada en el receptor, como un dispositivo electrónico de medición y/o un amplificador de medición y una memoria correspondiente para los datos de medición, así como medios de evaluación para llevar a cabo la transformada de Fourier y/o determinar el valor característico del material, pudiendo estos pasos llevarse a cabo, por ejemplo, mediante sistemas informáticos disponibles comercialmente. Además, se debe prever una unidad de control correspondiente.

[0008] En un cuerpo metálico magnetizable, los momentos magnéticos de los átomos (imanes elementales) están alineados paralelamente en áreas limitadas. La dirección de la magnetización se orienta según la red cristalina del material. Estas pequeñas áreas magnetizadas microscópicamente también se conocen como áreas de Weiss. Los límites entre las áreas se denominan paredes de Bloch. Cuando se expone un material de este tipo a un campo magnético creciente, las paredes de Bloch inicialmente se desplazan en favor de aquellas áreas de Weiss que están alineadas en la dirección del campo magnético externo. Además, la orientación de la magnetización dentro de un área de Weiss cambia abruptamente. Esto se conoce también como salto de Barkhausen. El desplazamiento de las paredes de Bloch ocurre de manera discontinua. Este es especialmente el caso cuando inclusiones no magnéticas o dislocaciones en una red cristalina mantienen localmente las paredes de Bloch. Bajo la influencia de un campo magnético externo, puede ocurrir un desprendimiento y desplazamiento brusco de la pared de Bloch. A partir del curso de la magnetización del cuerpo, se puede inferir su estructura microscópica, en particular el tamaño de los cristales, así como inclusiones y defectos dentro de los cristales. Estos defectos e inclusiones también influyen en las propiedades mecánicas del cuerpo. Por lo tanto, a partir de la señal generada debido al campo magnético del cuerpo examinado, se pueden inferir propiedades del cuerpo.

[0009] Preferentemente, se realiza una excitación en forma de pulso de la disposición de sensores micromagnéticos. El pulso de excitación puede ser un pulso sinusoidal o rectangular. También son posibles formas mixtas como pulsos en forma de diente de sierra. Es importante que un pulso positivo y un pulso negativo o parte de pulso sigan uno tras otro, es decir, que haya un cambio de signo. No es relevante si un pulso negativo sigue a un pulso positivo o viceversa. El pulso de excitación puede incluir algunas pocas oscilaciones sucesivas (<5 oscilaciones), tras las cuales se apaga la excitación y se mide la oscilación residual. Al limitar la excitación a un pulso de excitación corto, el procedimiento puede llevarse a cabo rápidamente. Se prefiere particularmente que la excitación se realice mediante exactamente una oscilación, que incluya partes positivas y negativas, y en particular una semionda positiva y una semionda negativa que se sucedan inmediatamente. Para una frecuencia de excitación dada, se realizan más ciclos de encendido y apagado por unidad de tiempo. El tiempo de medición se reduce y el procedimiento se puede llevar a cabo más rápidamente.

[0010] Preferentemente, el procedimiento incluye un ciclo de prueba con cuatro pasos sucesivos en el siguiente orden:

- a) Magnetización del cuerpo mediante un primer pulso de excitación;
- b) Desconexión de la excitación durante un primer tiempo muerto;

c) Excitación del cuerpo mediante un segundo pulso de excitación en un ciclo de medición;

d) Desconexión de la excitación durante un segundo tiempo muerto, durante el cual se realiza una medición de la señal en el receptor de la disposición de sensores tanto en el ciclo de medición como en el segundo tiempo muerto.

[0011] A través de la magnetización y el posterior decaimiento del campo magnético cambiante en el tiempo o de la señal en el receptor, se reducen las influencias de una posible magnetización remanente del cuerpo, que podría afectar la medición real. Tras esta magnetización, se lleva a cabo el ciclo de medición real, que incluye el ciclo de medición, en el que se excita el cuerpo mediante un segundo pulso de excitación, seguido de la desconexión de la excitación y un segundo tiempo muerto que sigue al ciclo de medición. Durante el ciclo de medición y el segundo tiempo muerto, se realiza una medición de la señal en el receptor de la disposición de sensores. Esta señal se somete total o parcialmente a una Transformada de Fourier y se determina el valor característico del material a partir de los componentes de Fourier.

[0012] La excitación se realiza preferentemente con una frecuencia de magnetización entre 500 y 5.000 Hz, preferentemente entre 800 y 1.600 Hz. Estas frecuencias de magnetización son muy altas en comparación con las frecuencias de magnetización utilizadas habitualmente de 50 Hz. Las altas frecuencias de magnetización permiten utilizar el procedimiento según la invención en el marco de procesos de inspección en línea. En los métodos de inspección en línea, la disposición de sensores se mueve con respecto al cuerpo. El desplazamiento entre la disposición de sensores y el cuerpo durante una medición que comprende un ciclo de prueba debería limitarse preferiblemente al 10% de la longitud de la disposición de sensores. Partiendo de una velocidad de avance de dos metros por segundo, una longitud de la disposición de sensores de 5 a 10 cm y un ciclo de prueba de cuatro periodos, comprendiendo el ciclo de prueba la magnetización, el primer tiempo muerto, el ciclo de medición y el segundo tiempo muerto y para cada uno de estos periodos del ciclo de prueba se proporciona el período del ciclo de medición que comprende una oscilación completa con cruce por cero, la frecuencia de magnetización mínima necesaria es de 800 Hz. Por lo tanto, la frecuencia de magnetización mínima necesaria depende del tamaño de la disposición del sensor micromagnético y de la velocidad de alimentación, siendo las disposiciones de sensores más pequeñas y las velocidades de alimentación más altas las que requieren frecuencias de magnetización más altas.

[0013] La disposición de sensor micromagnético se mueve preferiblemente con respecto al cuerpo con una velocidad de avance continuo de al menos 0,5 metros por segundo, preferiblemente entre 1 y 2 metros por segundo. Con estas velocidades de alimentación, el proceso es adecuado para una inspección en línea económica de tuberías.

[0014] La señal se mide preferentemente utilizando como receptor una bobina receptora con núcleo magnético. La señal representa en este caso la señal de corriente o tensión inducida en la bobina receptora por el campo magnético variable del cuerpo o del circuito magnético que comprende el cuerpo y la disposición de sensores. Dado que el comportamiento del circuito magnético está determinado esencialmente por el comportamiento magnético del cuerpo, las propiedades mecánicas del cuerpo se pueden deducir de la señal. De este modo es posible medir las propiedades del cuerpo promediadas en el alcance efectivo de la disposición de sensores. En una realización preferida, la disposición de sensores comprende un yugo magnético que forma los núcleos magnéticos de la bobina de excitación y de la bobina de recepción. Esto permite mejorar el flujo magnético en el circuito magnético. Se mejora la calidad de la señal de la disposición de sensores. Una disposición de sensores de este tipo con un yugo magnético se puede fabricar de forma sencilla.

[0015] Alternativamente, la medición de la señal se realiza mediante un sensor de campo magnético, en particular un elemento Hall, como receptor. Con un sensor de campo magnético, especialmente un elemento Hall, se puede medir el campo magnético local generado por la disposición de sensores micromagnéticos. Esto permite detectar también irregularidades del material que presentan longitudes y anchuras mucho menores que la longitud y el ancho de acción de la disposición de sensores, a partir de sus campos parásitos. También se pueden prever otros sensores de campo magnético como receptores, lo que proporciona más canales de medición y, por ejemplo, también permite detectar el despegue de la disposición de sensores del cuerpo a examinar.

[0016] También es posible utilizar una disposición de sensores con una bobina receptora y uno o varios sensores de campo magnético, como por ejemplo elementos Hall, como receptores. Aquí, se generan y miden varias señales en los múltiples receptores a través del campo magnético del circuito magnético. La evaluación adicional de las señales mediante Transformada de Fourier y la determinación del valor característico del material mediante al menos un componente de Fourier puede realizarse de forma separada para cada una de estas señales, para todas las señales por separado, para señales individuales en conjunto o para todas las señales en conjunto.

[0017] Preferentemente, se realiza una correlación del al menos un valor característico del material con los componentes de Fourier a partir de cuerpos de ensayo. Los cuerpos de ensayo se miden con el procedimiento de la invención según una de las reivindicaciones 1 a 7 y se determinan sus componentes de Fourier. Al mismo tiempo, se conocen los valores de material de los cuerpos de ensayo y/o se determinan antes o después de la determinación de los componentes de Fourier mediante otros métodos de medición, incluso en el contexto de una prueba destructiva de materiales. A través de una correlación de este tipo entre el valor característico del material y los componentes de Fourier, se puede determinar cuantitativamente el valor característico del material a partir de los componentes de Fourier.

[0018] La determinación de la correlación se realiza preferentemente mediante métodos de aprendizaje automático. Esto es especialmente ventajoso cuando la correlación entre los componentes de Fourier y el valor característico del material no es claramente evidente. El uso de métodos de aprendizaje automático permite así la creación de una correlación en relaciones complejas entre los componentes de Fourier y el valor característico del material a determinar. El procedimiento puede ser particularmente flexible para la determinación de diferentes valores de material.

[0019] Preferentemente, la determinación de la correlación se realiza mediante el método *Random Forest* o mediante una *Support Vector Machine*. Estos representan métodos de aprendizaje automático rápidos y confiables, mediante los cuales se puede determinar esta correlación con un bajo esfuerzo.

[0020] Preferentemente, el procedimiento determina un valor característico del material mecánico-tecnológico, como por ejemplo la tenacidad, en particular la tenacidad Charpy, las faltas de homogeneidad del material, como por ejemplo endurecimientos locales, y/o tensiones en el material, como por ejemplo tensiones de tracción. Preferentemente, también se determina más de un valor característico del material en el procedimiento con una medición. Así, el procedimiento de la invención puede ser utilizado para la determinación de diferentes valores de material. Los valores de material mencionados como ejemplos, como la tenacidad Charpy, las tensiones axiales y los endurecimientos locales, son relevantes, por ejemplo, en la aplicación del procedimiento en inspecciones en línea de tuberías. Sin embargo, el procedimiento no se limita a estos valores de material o a su aplicación en el contexto de inspecciones en línea de tuberías.

[0021] Una disposición de sensores micromagnéticos adecuado para llevar a cabo el procedimiento según una de

las reivindicaciones 1 a 11 incluye al menos una bobina de excitación para la excitación de señal y al menos un receptor. En este caso, el núcleo magnético de la bobina de excitación de la disposición de sensores está fabricado de un material nanocristalino con alta permeabilidad magnética. Este material de núcleo magnético altamente permeable garantiza, incluso a frecuencias en el rango de kHz, un flujo magnético relativamente alto. Los materiales nanocristalinos tienen cristales con tamaños de grano típicamente en el rango de 10-15 nm, separados por capas amorfas de unos pocos átomos de grosor. Los materiales típicamente tienen un grosor de 20 a 40 μm . Un núcleo magnético de material nanocristalino está construido a partir de múltiples capas delgadas.

[0022] Una disposición de sensores con un núcleo magnético de alta permeabilidad permite que el comportamiento de todo el circuito magnético de la disposición de sensores y el cuerpo a examinar, y por lo tanto la curva de histéresis, esté determinado aún en gran medida por el cuerpo a examinar, incluso a altas frecuencias de magnetización. Un material con una alta permeabilidad magnética tiene un μ_r entre 15 000 y 150 000.

[0023] Para operar la disposición de sensores micromagnéticos de la invención, se prevén medios conocidos en principio por el experto en la materia para generar la excitación de corriente o tensión con una frecuencia determinada, preferiblemente regulable, como un generador de funciones y su control correspondiente, medios correspondientes para registrar la señal generada en el receptor, como un dispositivo de medición electrónica y/o un amplificador de medición y una memoria correspondiente para los datos de medición, así como medios de evaluación para realizar la Transformada de Fourier y/o determinar el valor característico del material, pudiendo llevarse a cabo estos pasos, por ejemplo, mediante sistemas informáticos comerciales. Además, se debe prever una unidad de control correspondiente.

[0024] Preferentemente, el receptor está formado por una bobina receptora con un núcleo magnético. En esta, se induce una señal de corriente y/o tensión a través del campo magnético variable en el tiempo. Esto da lugar a una disposición de sensores especialmente robusto. En una forma de realización preferida, la disposición de sensores incluye un yugo magnético que forma los núcleos magnéticos de la bobina de excitación y de la bobina receptora.

[0025] Alternativamente o adicionalmente, el receptor está formado por un sensor de campo magnético, en particular un elemento Hall. El sensor de campo magnético permite medir el campo magnético local generado por la disposición de sensores, el cual está determinado fundamentalmente por las propiedades magnéticas del cuerpo a examinar. Esto permite detectar también cambios en la homogeneidad del material que presentan longitudes y anchos mucho menores que las longitudes y anchos de acción de la disposición de sensores, a partir de sus campos parásitos.

[0026] En una forma de realización especialmente preferida, la disposición de sensores incluye al menos un yugo magnético que forma al menos el núcleo magnético de la bobina de excitación, así como tres sensores de campo magnético, uno en cada extremo del yugo y otro entre los extremos del yugo, en un lado del arco del yugo que está orientado hacia el cuerpo a examinar. Los sensores de campo magnético colocados en los extremos del yugo se utilizan principalmente para determinar un despegue del sensor del cuerpo. El sensor de campo magnético colocado entre los extremos del yugo sirve principalmente para medir, como se describió anteriormente, un campo magnético local. Además, los sensores de campo magnético proporcionan canales de medición adicionales para la disposición de sensores. Estos sensores de campo magnético pueden estar, por ejemplo, diseñados como elementos Hall.

[0027] Preferentemente, la disposición de sensores también incluye un sensor de temperatura. Esto es especialmente importante al utilizar un elemento Hall como receptor, ya que la señal de un elemento Hall depende de la temperatura. Además, el valor característico del material a determinar también puede depender de la temperatura, por lo que conocer la temperatura en la que se determinó el valor característico del material es importante para clasificar correctamente el valor característico del material.

[0028] Preferentemente, la disposición de sensores tiene una longitud entre 5 y 10 cm. Una disposición de sensores con tales dimensiones es especialmente adecuada para inspecciones en línea, ya que, por un lado, es lo suficientemente grande como para no verse afectado por un efecto de despegue y, por otro lado, su tamaño y peso son adecuados para su uso en línea.

[0029] Además, la disposición de sensores puede ser utilizada en un cerdo de inspección para la inspección en línea de tuberías. Preferiblemente, un cerdo de inspección de este tipo tiene de cuatro a ocho disposiciones de sensores distribuidas a lo largo de su circunferencia. De este modo, un cerdo de inspección permite de manera sencilla determinar el valor característico del material en puntos específicos distribuidos a lo largo de la circunferencia de la tubería. Esto permite obtener una imagen completa sobre las propiedades del material o el estado del material de la tubería a inspeccionar. Alternativamente, también puede realizarse una cobertura total de la tubería por el cerdo de inspección, por ejemplo, si se quieren detectar faltas de homogeneidad del material y/o examinar una costura longitudinal de la tubería. Para una cobertura total, se disponen las disposiciones de sensores en varias capas de medición dispuestas axialmente una tras otra, donde los sensores en cada capa de medición están desplazados en la dirección circunferencial de tal manera que los huecos existentes entre las disposiciones de sensores de una capa de medición son cubiertos por las disposiciones de sensores de otras capas de medición.

[0030] Otras ventajas y detalles de la invención se pueden deducir de la descripción que sigue de las figuras, con ejemplos de configuraciones según la invención. En las figuras se muestra de manera esquemática:

Fig. 1: un diagrama de flujo del procedimiento según la invención,

Fig. 2: una disposición de sensores micromagnéticos para llevar a cabo el procedimiento,

Fig. 3: un ciclo de prueba del procedimiento según la invención,

Fig. 4: una señal de excitación, la señal resultante y la Transformada de Fourier de la señal,

Fig. 5: el resultado de la determinación de la tenacidad Charpy mediante el procedimiento según la invención,

Fig. 6: el resultado de una medición de un endurecimiento local con un dispositivo portátil de medición de dureza,

Fig. 7: el resultado de una medición con el procedimiento micromagnético según la invención utilizando la bobina receptora dispuesta en el arco del yugo como receptor,

Fig. 8: el resultado de una medición con el procedimiento según la invención utilizando el elemento Hall en el centro del yugo como receptor,

Fig. 9: correlación entre un componente de Fourier obtenido con el procedimiento según la invención y la tensión de tracción en un cuerpo examinado,

Fig. 10: un cerdo de inspección para la inspección en línea de tuberías con la disposición de sensores.

[0031] Partes que funcionan igual o de manera similar están, cuando es útil, marcadas con números de referencia idénticos. Características técnicas individuales de los ejemplos de realización descritos a continuación pueden ser combinadas con las características de la reivindicación 1 así como con las características de ejemplos de realización específicos descritos anteriormente.

[0032] La Fig. 1 muestra un ejemplo de procedimiento según la invención para determinar al menos un valor característico del material de un cuerpo metálico magnetizable 26 mediante una disposición de sensores micromagnéticos 18, que incluye al menos una bobina de excitación 22 con núcleo magnético y al menos un

receptor. El núcleo magnético de la bobina de excitación 22 está formado por el yugo magnético 20. El al menos un valor característico del material se determina localmente en el cuerpo 26. Preferiblemente, la disposición de sensores 18 y el cuerpo 26 se mueven entre sí.

En un ciclo de prueba 2 se lleva a cabo primero una magnetización, en la cual se aplica una señal de excitación a la bobina de excitación 22 de la disposición de sensores 18. Esto magnetiza el yugo/bobina magnético/a 20 y genera un campo magnético que magnetiza el cuerpo 26.

Con una señal de excitación que cambia en el tiempo, el campo magnético y, por lo tanto, la magnetización del cuerpo 26 también son variables en el tiempo. A la magnetización inicial 4 le sigue un primer tiempo muerto 6. Durante este tiempo, el campo magnético variable en el circuito magnético de la disposición de sensores 18 y el cuerpo 26 puede oscilar. Esto reduce cualquier magnetización remanente en el cuerpo 26 que pudiera distorsionar la medición real que sigue en el ciclo de medición 8. El ciclo de medición real 8 se divide en el ciclo de medición 10, donde se genera un campo magnético variable en el tiempo a través de un pulso de excitación en la bobina de excitación 22 de la disposición de sensores 18. El pulso de excitación presenta al menos un cambio de signo entre una parte positiva de una semionda y una parte negativa de una semionda. Esto provoca una inversión de la magnetización en el cuerpo. El campo magnético variable, determinado por el circuito magnético de la disposición de sensores 18 y el cuerpo 26, genera una señal en el receptor que se registra. A partir de esto se puede deducir el curso temporal de la magnetización del cuerpo 26. Esto, a su vez, permite inferencias sobre las propiedades del material del cuerpo 26. Tras el ciclo de medición 10, se apaga la excitación. Luego sigue un segundo tiempo muerto 12. Durante el segundo tiempo muerto 12 se mide la oscilación de la señal en el receptor tras apagar la excitación. Al menos la parte de la señal resultante de la oscilación se somete en el paso 14 a una Transformada de Fourier. Preferiblemente, la señal se utiliza en la Transformada de Fourier durante el ciclo de medición 10 y el tiempo muerto 12, que juntos forman el ciclo de medición 8. A partir de los componentes de Fourier, en el paso 16 se determina al menos un valor característico del material.

[0033] El pulso de excitación en los siguientes ejemplos de realización es un pulso sinusoidal de dos semiciclos con un cruce por cero. También son concebibles pulsos en forma de rectángulo o pulsos de otra forma con un cambio de signo. Para permitir un procedimiento de medición lo más rápido posible, el pulso de excitación se limita a exactamente una oscilación que incluye un semiciclo positivo y un semiciclo negativo que se suceden inmediatamente.

[0034] La Fig. 2 muestra una disposición de sensores 18 para llevar a cabo el procedimiento. La disposición de sensores 18 cuenta con un yugo magnético 20 y dos bobinas de excitación 22 conectadas en paralelo que envuelven las patas del yugo magnético 20 en sus respectivos extremos. La disposición de sensores 20 también incluye receptores. Uno de estos receptores está formado por una bobina receptora 32 en el arco del yugo magnético 20. El yugo magnético 20 forma los núcleos magnéticos de la bobina de excitación 22 y la bobina receptora 32. También son concebibles disposiciones de sensores 18 con solo una bobina de excitación 22 y una bobina receptora 32. En tal caso, típicamente, la bobina receptora 32 está dispuesta en una pata del yugo magnético 20 en lugar de en el arco 28. Esta disposición de sensores 18 es más fácil de fabricar, ya que las bobinas 22, 32 pueden ser enrolladas independientemente del yugo magnético 20 y luego deslizarse sobre las patas del yugo magnético 20. En la bobina receptora 32, se inducen corrientes y/o tensiones a través de un campo magnético variable en el tiempo de un circuito magnético formado por el yugo magnético 20 y el cuerpo 26. Estas generan una señal que puede ser medida. La disposición de sensores 18 de la Fig. 2 también incluye elementos Hall 30. Dos de estos elementos Hall 30 están dispuestos en las patas del yugo magnético 20. A través de ellos, se puede detectar el despegue de la disposición de sensores 18 del cuerpo 26 durante un movimiento relativo entre la disposición de sensores 18 y el cuerpo 26, y esto se puede tener en cuenta en la evaluación. Un tercer elemento Hall 30, dispuesto entre las dos patas en el lado del yugo magnético 20 que está orientado hacia el cuerpo 26, está diseñado para registrar cambios locales en el campo magnético del circuito magnético formado por la disposición de sensores 18 y el cuerpo 26. Es concebible añadir más elementos Hall 30. No se muestra un sensor de temperatura, que puede ser necesario para corregir la señal de los elementos Hall 30 y para registrar la temperatura durante la medición, lo que permite clasificar correctamente un valor característico del material dependiente de la temperatura determinado de esta manera. La señal de un elemento Hall 30 es dependiente de la temperatura.

[0035] La Fig. 3 muestra la señal de excitación en la bobina de excitación 22 a lo largo del tiempo durante un ciclo de prueba 2. Este abarca las cuatro fases: magnetización inicial 4, primer tiempo muerto 6, ciclo de medición 10 y segundo tiempo muerto 12. En el ejemplo de la Fig. 3, la excitación se realiza mediante una señal sinusoidal con dos semiondas, donde la magnetización inicial, el primer tiempo muerto y el ciclo de medición tienen una duración temporal que corresponde exactamente a una oscilación de la señal de excitación. El segundo tiempo muerto 12, en cambio, se elige más largo.

[0036] La Fig. 4 muestra en la parte superior la señal de excitación a lo largo del tiempo y debajo también a lo largo del tiempo la señal en el receptor, que se mide durante el ciclo de medición 8. Se puede ver la excitación en el ciclo de medición 10 a través de una oscilación sinusoidal con una semionda positiva y una semionda negativa y un cambio de signo. La señal muestra la progresión durante el ciclo de medición 10 y la oscilación A en el segundo tiempo muerto 12. Esta señal se somete a una Transformada de Fourier 14, de la cual se derivan componentes de Fourier individuales (figura inferior con la amplitud de FFT en unidades arbitrarias sobre el canal FFT). Estas componentes de Fourier tienen una correlación con el valor característico del material buscado. Para una determinación cuantitativa del valor característico del material, es necesario calibrar el procedimiento de medición utilizando cuerpos de ensayo con valores de material conocidos, sobre los cuales se lleva a cabo el procedimiento según la invención. En este caso, se relacionan uno o más componentes de Fourier con el valor característico del material. Esta relación puede ser simple si un componente de Fourier resulta ser directamente proporcional al valor característico del material buscado o si el valor característico del material puede determinarse a partir de una o unas pocas componentes de Fourier mediante relaciones simples. Sin embargo, la relación también puede resultar muy compleja. En tal caso, la correlación puede llevarse a cabo, por ejemplo, mediante métodos de aprendizaje automático como el método de *Random Forest* o una *Support Vector Machine*.

[0037] La Fig. 5 muestra el uso del procedimiento según la invención para determinar la tenacidad Charpy de tuberías. Para ello, se examinaron segmentos extraídos de tuberías antiguas. De cada segmento se tomaron piezas de muestra, sobre las cuales se determinó la tenacidad Charpy mediante ensayo de impacto a temperatura ambiente. Se realizó la medición conforme al procedimiento según la invención. En este caso, se determinaron 30 componentes complejas de Fourier, que se correlacionaron mediante aprendizaje automático según el método *Random Forest* con las tenacidades Charpy experimentales de las muestras. El entrenamiento se realizó según el método N-1, en el que se utilizaron 23 muestras para el entrenamiento y la calibración obtenida se probó en la muestra 24. El procedimiento proporciona una correlación útil de los resultados de medición calibrados mediante el método de aprendizaje automático con las tenacidades Charpy determinadas mediante el ensayo de impacto.

[0038] Las Fig. 6, 7 y 8 muestran los resultados del uso del procedimiento según la invención para medir faltas de homogeneidad del material, tomando como ejemplo endurecimientos locales. Para ello, se generó un endurecimiento local en un cuerpo de prueba mediante endurecimiento inductivo. Con un inductor en forma de herradura, el cuerpo fue calentado localmente hasta el rojo vivo y luego enfriado con agua. La Fig. 6 muestra los resultados de una medición de dureza con un procedimiento de medición de dureza portátil según el método de impedancia de contacto por ultrasonidos. La medición se realiza en una cuadrícula de medición de 2 x 2 mm. La Fig. 7 muestra el resultado de una medición con el procedimiento según la invención utilizando la disposición de sensores 18, donde este resultado se determinó en base a la señal medida en la bobina receptora 32 dispuesta en el arco 28. El endurecimiento puede ser detectado mediante el procedimiento según la invención, aunque la resolución es difusa debido a la gran superficie efectiva de la disposición de sensores 18. La Fig. 8 muestra el resultado cuando para la evaluación se utiliza la señal del elemento Hall 30 dispuesto en el centro del yugo magnético 20, que puede detectar campos dispersos locales del campo magnético. Esto también permite resolver la forma ovalada del endurecimiento mediante el procedimiento según la invención.

[0039] La Fig. 9 muestra el uso del procedimiento según la invención para medir tensiones en materiales, tomando como ejemplo tensiones de tracción. Para ello, se realizó una prueba de tracción, en la que se determinó la tensión de tracción en el cuerpo de prueba mediante un sensor fijado al cuerpo. Al mismo tiempo, se realizaron mediciones durante la prueba de tracción utilizando el procedimiento según la invención. A partir de la Transformada de Fourier de la señal resultante se pudo determinar un componente de Fourier único que mostró una buena correlación con la tensión de tracción. Por tanto, también se pueden determinar tensiones de tracción mediante el procedimiento según la invención.

[0040] La Fig. 10 muestra un cerdo de inspección en línea 34 para la inspección en línea de tuberías, que está equipado con las disposiciones de sensores 18 correspondientes. El cerdo 34 representado cuenta con ocho disposiciones de sensores distribuidas a lo largo de la circunferencia. También pueden ser suficientes cuatro o seis disposiciones de sensores distribuidas a lo largo de la circunferencia para obtener una descripción suficiente del estado del material de la tubería, ya que, en general, para determinar la tenacidad, actualmente solo se toman muestras de un segmento de tubería en ciertos puntos distribuidos a lo largo de la circunferencia, que luego se someten a un ensayo de impacto. Sin embargo, también son concebibles cerdos de inspección 34 que logran una cobertura total de la superficie interna de una tubería. Para tal cobertura total, se disponen las disposiciones de sensores en varias capas de medición dispuestas axialmente una tras otra, donde las disposiciones de sensores en las diferentes capas de medición están desplazadas entre sí en la dirección circunferencial, de modo que los huecos existentes entre las disposiciones de sensores de una capa de medición son cubiertos por las disposiciones de sensores de otras capas de medición. Con un cerdo de inspección 34 de este tipo, se pueden, por ejemplo, detectar faltas de homogeneidad del material o examinar una costura longitudinal de la tubería.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para determinar al menos un valor característico del material de un cuerpo metálico magnetizable (26) mediante una disposición de sensores micromagnéticos (18), que incluye al menos una bobina de excitación (22) con un núcleo magnético para la excitación de señales, así como al menos un receptor, que comprende los pasos:
- Magnetización del cuerpo (26) mediante la disposición de sensores (18) a través de una excitación de corriente o tensión de la disposición de sensores (18), que incluye al menos un cambio de signo entre una parte positiva de un semiciclo y una parte negativa de un semiciclo,
 - Medición de al menos una señal en el receptor,
 - Transformada de Fourier de la señal,
 - Determinación del valor característico del material a partir de al menos un componente de Fourier, caracterizado por los pasos adicionales:
 - Cese de la excitación y
 - Medición de la oscilación de la señal en el receptor después de apagar la excitación y utilización al menos de la parte de la señal resultante de la oscilación en la Transformada de Fourier.
2. Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque se realiza una excitación en forma de pulso.
3. Procedimiento según la reivindicación 2, caracterizado porque la excitación se realiza mediante exactamente una oscilación que incluye un semiciclo positivo y un semiciclo negativo que siguen inmediatamente.
4. Procedimiento según la reivindicación 2 o 3, caracterizado porque el procedimiento comprende los siguientes pasos en el orden mencionado:
- a) Magnetización del cuerpo (26) mediante un primer pulso de excitación,
 - b) Apagado de la excitación durante un primer tiempo muerto,
 - c) Excitación del cuerpo (26) mediante un segundo pulso de excitación en un ciclo de medición,
 - d) Apagado de la excitación durante un segundo tiempo muerto, donde en el ciclo de medición y en el segundo tiempo muerto se realiza una medición de la señal de inducción.
5. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque la excitación se realiza con una frecuencia de magnetización entre 500 y 5000 Hz, preferiblemente entre 800 y 1600 Hz.
6. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque la medición de la señal se realiza mediante una bobina receptora (32) con un núcleo magnético como receptor, donde la disposición de sensores (18) preferiblemente incluye un yugo magnético (20) que forma los núcleos magnéticos de la bobina de excitación (22) y de la bobina receptora (32).
7. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque la medición de la señal se realiza mediante un sensor de campo magnético como receptor.
8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque se realiza una correlación del al menos un valor característico del material con al menos un componente de Fourier a partir de cuerpos de ensayo, cuyos componentes de Fourier se midieron mediante un procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7 y cuyos valores de material son conocidos y/o fueron determinados antes o después de la determinación de los componentes de Fourier mediante otros métodos de medición, posiblemente también a través de ensayos destructivos.
9. Procedimiento según la reivindicación 8, caracterizado porque la determinación de la correlación se realiza mediante un procedimiento de aprendizaje automático.
10. Procedimiento según la reivindicación 9, caracterizado porque la determinación de la correlación se realiza según el método *Random Forest* o mediante *Support Vector Machine* (SVM).
11. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque se determinan un valor característico del material mecánico-tecnológico, como por ejemplo la tenacidad Charpy, faltas de homogeneidad del material, como por ejemplo endurecimientos locales y/o tensiones de material, como por ejemplo tensiones de tracción.

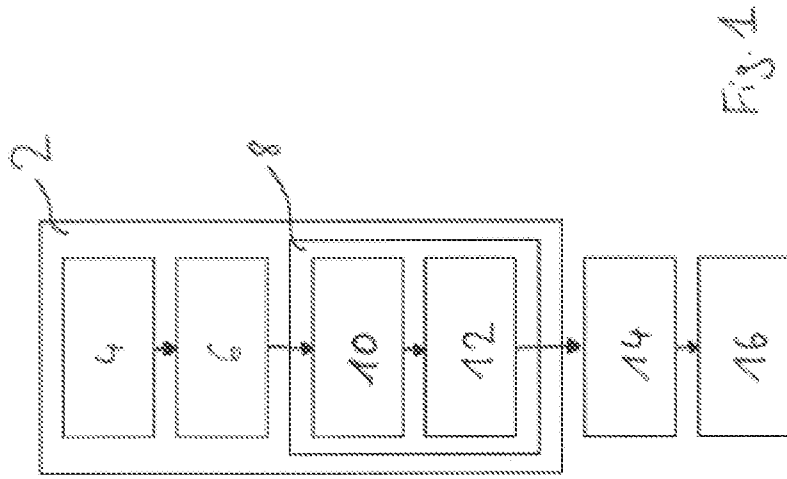


Fig. 1

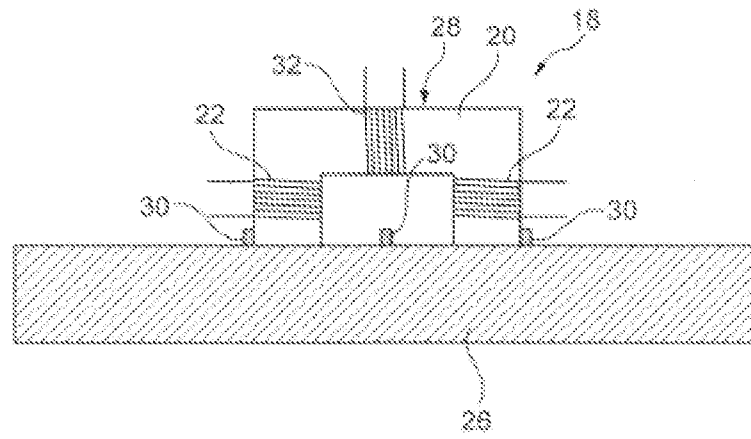


Fig. 2

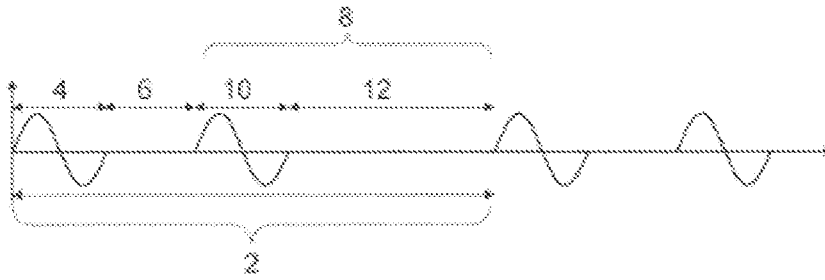


Fig. 3

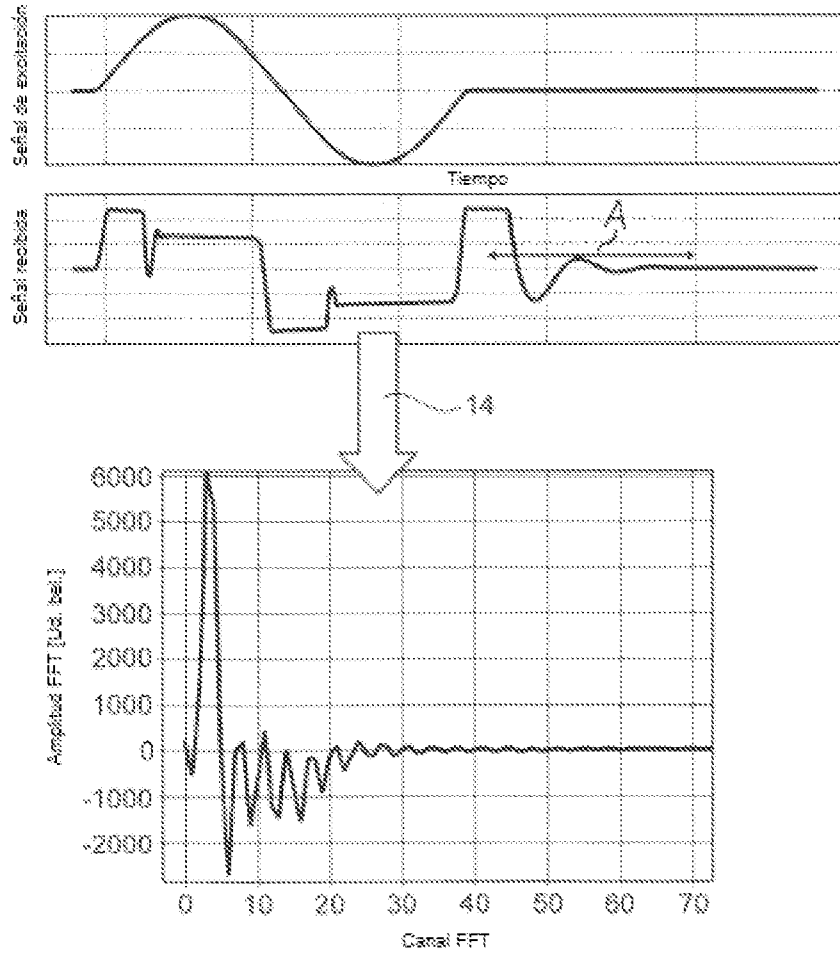


Fig. 4

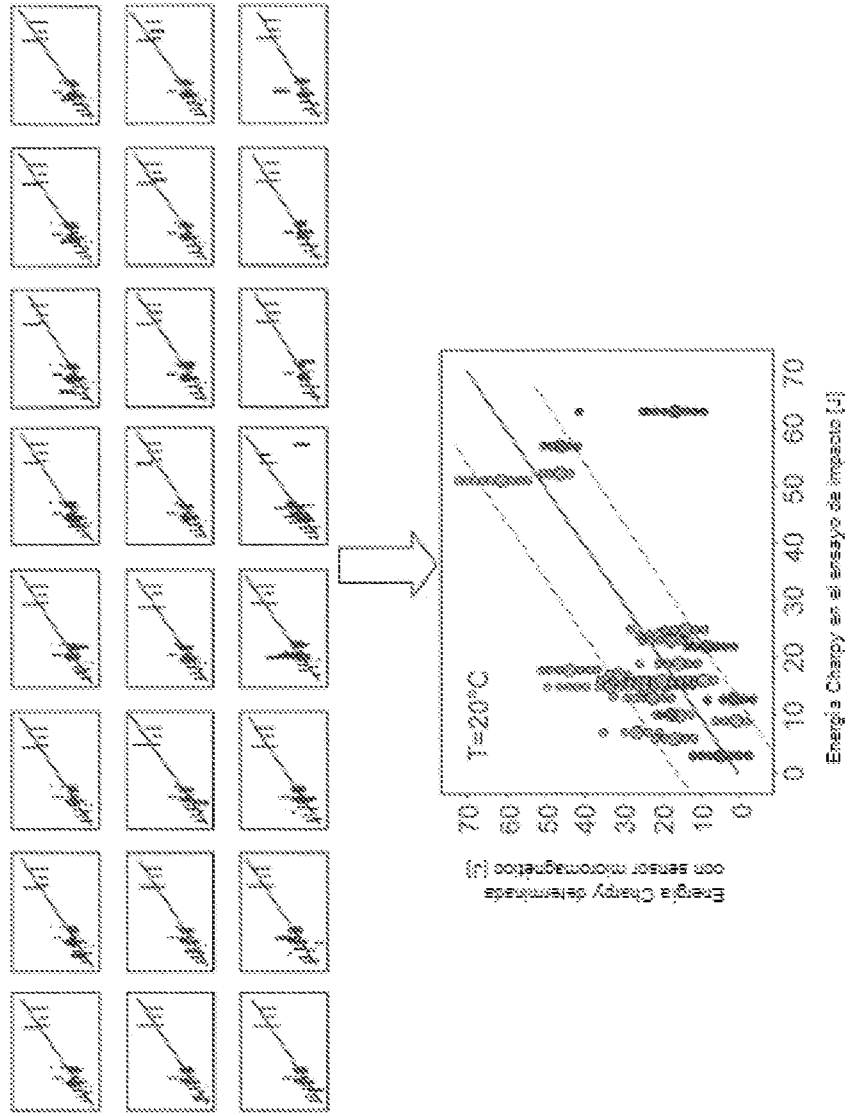


Fig. 5

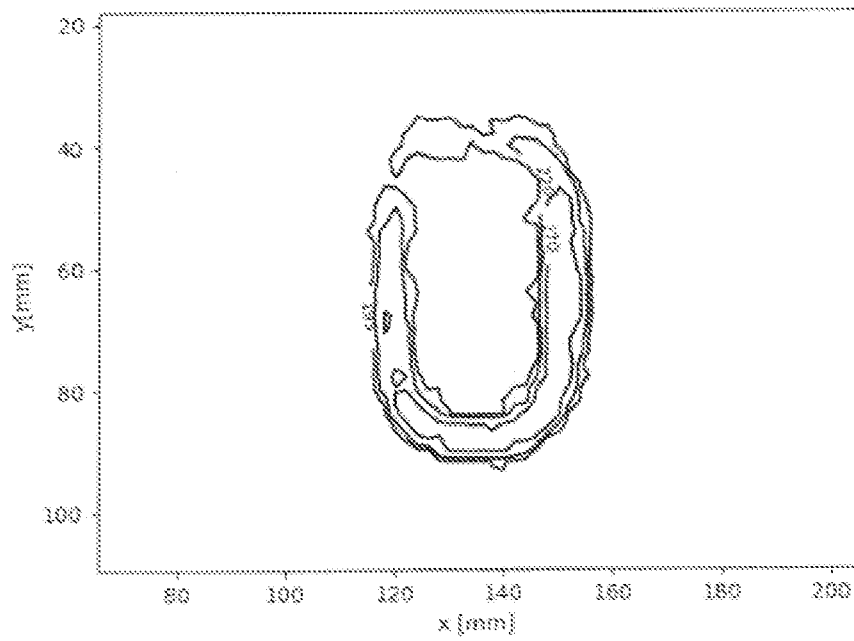


Fig. 6

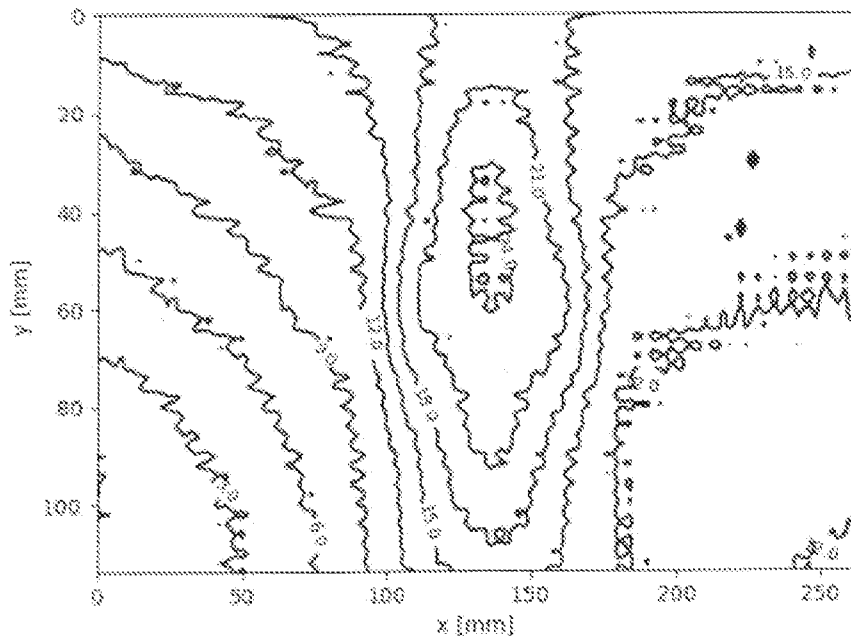


Fig. 7

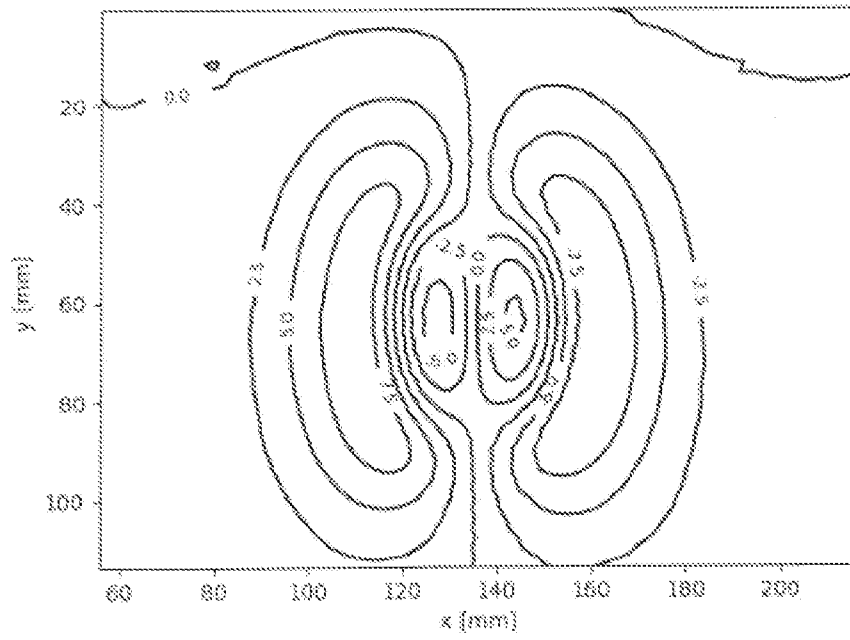


Fig. 8

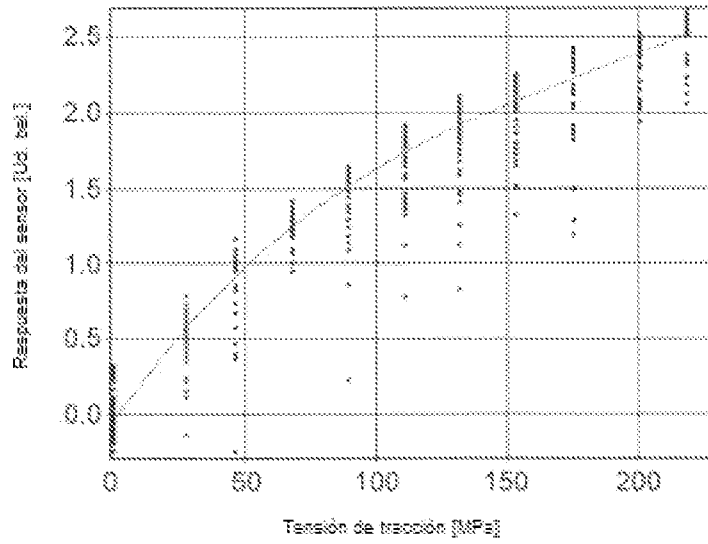


Fig. 9

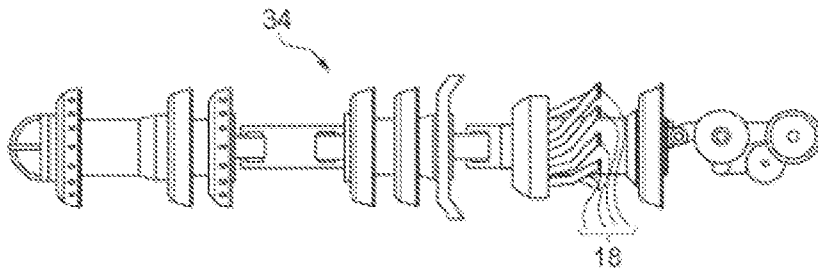


Fig. 10