

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 761 264**

51 Int. Cl.:

G01N 29/04 (2006.01)

G01N 29/26 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.05.2010 PCT/EP2010/056614**

87 Fecha y número de publicación internacional: **18.11.2010 WO10130819**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.05.2010 E 10718617 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **25.09.2019 EP 2430435**

54 Título: **Método de fabricación de una sonda de ensayo y un dispositivo de ensayo para el ensayo ultrasónico no destructivo de una pieza de trabajo**

30 Prioridad:

14.05.2009 DE 102009003131

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

19.05.2020

73 Titular/es:

**GE SENSING & INSPECTION TECHNOLOGIES
GMBH (100.0%)
Robert-Bosch-Str. 3
50354 Hürth, DE**

72 Inventor/es:

**KLEINERT, WOLF-DIETRICH y
SPLITT, GERHARD**

74 Agente/Representante:

DEL VALLE VALIENTE, Sonia

ES 2 761 264 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

Método de fabricación de una sonda de ensayo y un dispositivo de ensayo para el ensayo ultrasónico no destructivo de una pieza de trabajo

La presente invención se refiere a una sonda de ensayo para el ensayo ultrasónico no destructivo de una pieza de trabajo, a un dispositivo de ensayo para el ensayo ultrasónico no destructivo de una pieza de trabajo, a una familia de sondas de ensayo para el ensayo ultrasónico no destructivo de una pieza de trabajo y a la utilización de una sonda de ensayo o de una familia de sondas de ensayo según la presente invención. La invención se refiere en particular a una insonación angular en el caso de superficies específicas de una pieza de trabajo curvada. En el contexto de la presente solicitud, a un objeto que deba someterse a ensayo se le designa, para simplificar, "pieza de trabajo" o "unidad en ensayo".

En particular, la presente invención se refiere al campo de los ensayos ultrasónicos en el marco del denominado método DGS.

El método DGS (DGS = Distance, Gain, Size [DGS = distancia, ganancia, tamaño]) se ha conocido desde hace mucho tiempo del estado de la técnica. El método DGS fue desarrollado originalmente para sondas de haces rectos con transductores circulares planos que generan un campo de sonido con simetría rotacional en el material de ensayo. Se basa en la comparación de la amplitud del eco de un reflector real en una pieza de trabajo (por ejemplo, de una inclusión, una cavidad, una fisura, etc.) con señales de eco de reflectores de disco circulares. Con la ayuda del denominado diagrama de DGS, un inspector puede determinar un equivalente reflector sitem (tamaño de reflector equivalente - ERS) caracterizando el reflector real a través de la comparación de la amplitud del eco de un reflector real con una disposición de curvas de reflectores de disco circulares registrada en el diagrama de DGS. Para ello selecciona la ganancia del dispositivo, de forma que un eco de referencia (por regla general un eco reflejado por una pared) alcance una altura preestablecida de pantalla. Además, el eco del reflector se ajusta por medio del ajuste de ganancia a la misma altura de pantalla. Entran en la evaluación DGS la diferencia de ganancia entre el eco de referencia y el del reflector, así como los recorridos del sonido. A menudo el método DGS se utiliza para dimensionar los reflectores en la pieza de trabajo que, por ejemplo, excedan los límites de registro preestablecidos por las normas técnicas (véase por ejemplo EN 583-2). Puede obtenerse información adicional sobre el ensayo ultrasónico no destructivo de una pieza de trabajo, en particular mediante el método DGS, del libro J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, *Materials Testing with Ultrasonic Sound*, 1986 (5ª edición), editado en the Springer Publishing House (ISBN 3-540-15754-9), especialmente en el capítulo 19.2.

Sin embargo, en el caso de estudios experimentales recientes por medio del método DGS, se descubrió que con mediciones en la insonación angular o de una insonación en el caso de superficies específicas de la pieza de trabajo curvada, se producían de forma inesperada grandes desviaciones de los valores esperados para los reflectores de disco circulares examinados. El tamaño de la desviación dependía, de este modo, del tipo de sonda de ensayo utilizada.

De EP 1 764 614 A1 se conoce una sonda para la inspección de una pieza de trabajo basada en ultrasonido. La sonda comprende una disposición de transductores que tiene una pluralidad de elementos de transductor. La sonda comprende además un cuerpo de retardo fabricado de un material sólido, en donde una parte del cuerpo de retardo tiene la forma de una cuña esférica con una superficie exterior curva. Cada punto en la superficie exterior curva está separado de un punto de origen por un radio constante. Si bien esta sonda está destinada a facilitar el análisis de las señales de ultrasonido reflejadas desde la pieza de trabajo inspeccionada, sigue presentando inconvenientes por la forma distorsionada del haz después de que el haz de ultrasonidos se haya acoplado a la pieza de trabajo. Además, esta distorsión depende del ángulo de acoplamiento realizado, haciendo que el análisis de la señal reflejada sea una tarea aún más sofisticada.

En US-4.195.530 se describe también una sonda de ensayo relacionada.

Por lo tanto, la tarea de la presente invención era fabricar una sonda de ensayo para el ensayo ultrasónico no destructivo de materiales, especialmente con la insonación angular o con la insonación en una superficie específica de una pieza de trabajo curvada con una forma tal que el campo de sonido formado en la pieza de trabajo permita una interpretación o evaluación especialmente sencilla de las señales de eco. Además, debería fabricarse un dispositivo de ensayo con una sonda de ensayo y una unidad de control que permita obtener las mismas ventajas.

Esta tarea se soluciona mediante un método de fabricación de una sonda de ensayo según la reivindicación 1 y un método de fabricación de un dispositivo de ensayo según la reivindicación 8.

En el caso de una insonación en una pieza de trabajo con una superficie específica plana, la solución de esta tarea se basa en la propuesta de transferir matemáticamente el campo de sonido de una sonda de ensayo perpendicular preestablecida con un transductor ultrasónico circular plano y una línea de retardo conocida, a un transductor de insonación angular con una línea de retardo y un ángulo de insonación preestablecidos, que forme en el material de ensayo el mismo campo de sonido en el ángulo de insonación seleccionado que la sonda de ensayo perpendicular preestablecida.

Por otro lado, si se examina una insonación en una pieza de trabajo con una superficie específica no plana, la solución de la tarea se basa en la propuesta de transferir matemáticamente el campo de sonido de la sonda de ensayo perpendicular preestablecida con un transductor ultrasónico circular plano y una línea de retardo conocida en el caso de insonación en una superficie específica plana, a un transductor de insonación perpendicular con una línea de retardo preestablecida, en la que el diseño de la superficie específica de acoplamiento del cuerpo de la línea de retardo, es decir, el área que está en contacto con la pieza de trabajo, a la que se ajusta la superficie específica no plana de la pieza de trabajo. Aquí, se menciona de forma ilustrativa una superficie específica de la pieza de trabajo curvada cilíndricamente. De este modo, el último transductor debería formar el mismo campo de sonido en el material de ensayo en las condiciones de insonación seleccionadas de la superficie específica no plana de la pieza de trabajo que la sonda de ensayo perpendicular preestablecida en el caso de insonación en un área específica plana.

En el caso de la línea de retardo, también puede ser una cuestión de agua, es decir, la sonda de ensayo se utiliza en el denominado método de la técnica de inmersión.

Por último, partiendo de las mismas consideraciones, también es posible el examen del caso general de una insonación angular a través de una superficie no plana de la pieza de trabajo.

Se proporciona una sonda de ensayo para el ensayo ultrasónico no destructivo de una pieza de trabajo con una insonación angular. Tiene un transductor ultrasónico para la generación de un campo ultrasónico, que se acopla acústicamente a un cuerpo de la línea de retardo. Por su parte, el cuerpo de la línea de retardo se proporciona para acoplar el campo ultrasónico que se va a ajustar en la pieza de trabajo con un área de acoplamiento en una superficie específica de la pieza de trabajo. Esta superficie específica puede ser plana, pero también puede ser curva. Como regla, la superficie específica de acoplamiento del cuerpo de la línea de retardo está diseñada de forma complementaria a la geometría de la pieza de trabajo que se va a examinar.

En el contexto de los complejos estudios teóricos y experimentales, se acaba de demostrar que la interpretabilidad de las señales ultrasónicas que proceden de reflectores en el volumen de la pieza de trabajo puede mejorarse considerablemente si se asegura, a través de medidas técnicas apropiadas, que el campo ultrasónico generado por la sonda de ensayo después del acoplamiento a la pieza de trabajo sea sustancialmente axisimétrico con respecto a su dirección principal de propagación. Aquí es especialmente preferible una simetría rotacional real. Sin embargo, en el contexto de la presente invención por "con simetría rotacional" también debería entenderse un campo de sonido que tenga una simetría rotacional con respecto a la dirección principal de propagación, es decir, que pueda transformarse en sí mismo por una rotación alrededor de la dirección principal de propagación de, por ejemplo, 120° (simetría triple), 90° (simetría cuádruple) o también 60° (simetría séxtuple).

Según un método de la presente invención, la superficie específica del cuerpo de la línea de retardo en la que se sitúa el transductor ultrasónico, no tiene forma plana. En particular, el diseño de la superficie específica del cuerpo de la línea de retardo en la que se sitúa el transductor ultrasónico puede seleccionarse de modo que las ondas elementales que emanen de distintos puntos del transductor ultrasónico, a pesar de la insonación angular o la insonación a través de una superficie específica de la pieza de trabajo no plana en el volumen de la pieza de trabajo, se comporten como en el caso de la sonda de ensayo perpendicular preestablecida con un oscilador circular, es decir, formando en la pieza de trabajo el mismo campo de sonido axisimétrico con respecto al haz central.

Este problema puede resolverse transfiriendo el tiempo de vuelo de todos los haces de sonido desde una sonda de haces rectos con un transductor circular plano a una sonda de haz en ángulo con una longitud de línea de retardo dada y un ángulo de insonación dado teniendo en cuenta el principio de Fermat y la refracción en la interfaz entre la línea de retardo y el material de ensayo. Este cálculo se lleva a cabo para todos los haces de sonido posibles dentro del campo cercano. El campo cercano del transductor circular plano se caracteriza por el hecho de que la diferencia en tiempo de vuelo entre el haz central y los haces procedentes del perímetro del transductor circular es $T/2$, en el que T es la duración del ciclo del sonido ultrasónico. Al hacer esto, la nube de puntos resultante define la forma del nuevo transductor para la sonda de haz en ángulo.

Debe mencionarse que la condición especificada anteriormente es exactamente verdadera únicamente en el caso de ondas de ultrasonido continuas. Sin embargo, en la mayoría de configuraciones de ensayo se utilizan ondas de ultrasonido pulsadas. Como hallazgo experimental podemos señalar que el uso de ultrasonido pulsado en el contexto de la presente invención parece dar lugar a una desviación menor respecto de la condición clásica de campo cercano especificada anteriormente. Esta desviación puede correlacionarse con la alta dispersión de impulsos cortos de ultrasonido y puede explicarse introduciendo un factor de corrección A que es de naturaleza empírica. De forma típica, A está en el intervalo de 0,8 y 1. Por lo tanto, para mejorar la precisión general del método según la presente invención, se introduciría un factor de corrección A proporcional para cada sonda de ensayo dada que haya que determinar experimentalmente. De forma alternativa, en lugar de depender de la condición de longitud del campo cercano clásico, se determina un punto de partida nuevo para la evaluación del campo sonoro pulsado como se describe con más detalle en los párrafos anteriores que difiere de la condición de campo cercano clásico anteriormente mencionada. Se ha descubierto que una simulación numérica del campo de sonido de una sonda de ensayo dada que funcione en modo pulsado permite una determinación bastante precisa de la ubicación del último máximo de la presión sonora en el eje acústico. Esta ubicación se identifica

seguidamente como longitud de campo cercano numérico y explica la naturaleza específica de las ondas de ultrasonido pulsadas. Aunque el primer planteamiento es ventajoso debido a su simplicidad, el último produce resultados superiores en la aplicación práctica del método y la sonda según la presente invención.

5 Se ha hecho evidente que una sonda de ensayo fabricada según los métodos de la presente invención es especialmente adecuada para determinar el tamaño de un reflector en una pieza de trabajo por medio del método DGS en un ángulo de insonación dado y/o en el caso de una insonación a través de una superficie específica no plana de la pieza de trabajo.

10 A continuación se describen diversos conceptos técnicos con los que puede generarse una distribución del campo de sonido según la presente invención del campo ultrasónico generado por la sonda de ensayo después de su entrada completa en el volumen de la pieza de trabajo.

15 En la mayoría de aplicaciones, ha demostrado ser ventajoso que la superficie específica del cuerpo de la línea de retardo, en la que se sitúa el transductor ultrasónico, tenga un contorno en forma de S en el plano de insonación. De este modo, a ese plano se le denomina plano de insonación, que es fijado por la dirección principal de propagación del sonido ultrasónico en el cuerpo de la línea de retardo y la normal de la superficie en la superficie específica de la pieza de trabajo, en la ubicación de acoplamiento del sonido ultrasónico. La ubicación de acoplamiento viene dada por el punto en el que el eje acústico corta la superficie limitante entre el cuerpo de la línea de retardo y la pieza de trabajo.

20 Por otra parte, la perpendicular al plano de insonación ha demostrado ser ventajosa si la superficie específica del cuerpo de la línea de retardo, en la que se ubica el transductor ultrasónico, se describe mediante una función que tenga un mínimo absoluto en el plano de insonación. En particular, esta función puede corresponder prácticamente a una parábola abierta hacia arriba. En el contexto de esta solicitud, debería entenderse que se trata de una función que posea un mínimo absoluto que esté en el plano de insonación y, normalmente, abierta hacia arriba. A menudo, cerca del plano de insonación, la función puede aproximarse bien mediante una función parabólica y también, si es necesario, mediante un polinomio de orden superior (incluso = 4°, 6°, etc.).

30 Como se explicó anteriormente, ha demostrado ser ventajoso que el campo ultrasónico, que se forma en la pieza de trabajo, tenga simetría rotacional con respecto a la dirección principal de propagación en la pieza de trabajo. En particular, esto significa que la sección transversal del haz en la pieza de trabajo es circular. No obstante, ha demostrado ser ventajoso que el transductor ultrasónico en una sonda de haz en ángulo, utilizada para la generación del campo ultrasónico, no sea circular, es decir, no tenga una línea circunferencial circular. Más bien ha demostrado ser favorable si la línea circunferencial del transductor ultrasónico en general no tiene simetría rotacional, en particular si no es circular ni tiene la forma de un polígono regular.

35 Aceptando que un campo ultrasónico en la pieza de trabajo sea axisimétrico con respecto al haz central que, por su parte, se inclina hacia la normal de la superficie específica de la pieza de trabajo en el lugar de acoplamiento, es posible determinar, con la aplicación del principio de Fermat a los haces de sonido, la forma óptima y la línea circunferencial óptima de un transductor ultrasónico correspondiente, que se aplique a un área del cuerpo de la línea de retardo cuya normal de superficie se incline hacia la normal de la superficie específica de la pieza de trabajo en el lugar de acoplamiento. En la práctica de ensayos ultrasónicos, los ángulos típicos de insonación son de 25° a 75°, especialmente 45°, 60° y 70°. Los ángulos de inclinación requeridos se originan aquí a través de la aplicación de la ley de refracción en función del material original. Los datos de un campo ultrasónico en la pieza de trabajo pueden obtenerse, por ejemplo, calculando un campo ultrasónico de una sonda de ensayo típica para la insonación perpendicular con un transductor circular plano. Para simplificar, en el caso del cálculo del campo de sonido de esta sonda de ensayo de referencia, se prescinde de un cuerpo de la línea de retardo. Sobre la base del campo de sonido calculado de la sonda de ensayo de referencia, se examina ahora una sonda de ensayo con insonación angular con un cuerpo de la línea de retardo en donde el transductor ultrasónico se sitúa en una superficie específica del cuerpo de la línea de retardo, por ejemplo, adherido sobre ella. Además se estipula que, en la pieza de trabajo, el campo de sonido de la sonda de ensayo con insonación angular debería estar en consonancia con el campo sonoro de la sonda de ensayo de referencia con insonación perpendicular, es decir, en la pieza de trabajo debería existir simetría rotacional con respecto a la dirección principal de propagación así como en el extremo del campo cercano el último máximo de presión de sonido en la dirección principal de propagación. En las condiciones límite mencionadas, puede determinarse la desviación del transductor ultrasónico de la sonda de ensayo que con insonación angular respecto a la configuración plana del transductor de la sonda de ensayo de referencia. Como resultado, se obtiene la geometría del área que ya no es plana del cuerpo de la línea de retardo a la que debería unirse el transductor ultrasónico.

50 Se obtiene una segunda mejora de la precisión si, además, se tiene en cuenta la dependencia angular del factor de acoplamiento del cuerpo de la línea de retardo - pieza de trabajo, tabulado para muchas combinaciones de materiales.

60 Por último, todavía puede tenerse en cuenta la atenuación de sonido, con frecuencia perceptible, en el cuerpo de la línea de retardo, lo que, debido a las distintas rutas de las varias ondas elementales en el cuerpo de la línea de retardo, lleva a una deformación adicional del lóbulo acústico transmitido por el transductor ultrasónico. También puede tenerse en cuenta a modo de cálculo.

65

Del examen de los haces perimetrales del campo ultrasónico aceptado como axisimétrico en la pieza de trabajo, también puede determinarse del modo descrito la forma precisa de la línea circunferencial de un transductor ultrasónico real.

En general, a partir de este cálculo, que requiere como parámetros de entrada, en general, la frecuencia del transductor ultrasónico, las velocidades del sonido en el cuerpo de la línea de retardo y en la pieza de trabajo, las líneas de retardo de la sonda de ensayo perpendicular y angular, el diámetro del transductor circular de la sonda de ensayo perpendicular y el ángulo de insonación, se obtiene

- la desviación resuelta espacialmente del transductor ultrasónico correspondiente (bidimensional, pero que se extiende en tres dimensiones) desde una superficie específica del cuerpo de la línea de retardo aceptada como plana, a la que se aplica/debería aplicarse el transductor ultrasónico, y

- la línea circunferencial del transductor correspondiente, cuyo campo ultrasónico, después de su acoplamiento a la pieza de trabajo en el caso de la insonación angular preestablecida en la pieza de trabajo, es axisimétrico con respecto a la dirección principal de propagación dentro del material de ensayo.

Las etapas de proceso mencionadas anteriormente permiten por tanto determinar un diseño corregido del área del cuerpo de la línea de retardo a la que se acopla acústicamente el transductor ultrasónico (“superficie de transductor”), por ejemplo, mediante unión adhesiva. Además, puede determinarse una forma concreta de la línea circunferencial del transductor ultrasónico correspondiente. Estos resultados pueden utilizarse inmediatamente, por ejemplo, para cortar un transductor ultrasónico con diseño ajustado, es decir, una línea circunferencial, de una película o placa plana de un material piezoeléctrico o compuesto, que sea adecuada para la producción de un transductor ultrasónico. A través del mecanizado de acabado correspondiente de la superficie de transductor del cuerpo de la línea de retardo a la que el transductor ultrasónico se acopla acústicamente, por ejemplo, mediante mecanizado CNC, puede conseguirse la desviación requerida del transductor ultrasónico correspondiente respecto a la configuración plana. Se ha comprobado que es razonable determinar una configuración específica del transductor correspondiente (línea circunferencial, desviación de una configuración plana) para una geometría preestablecida del cuerpo de la línea de retardo, una frecuencia de transductor ultrasónico preestablecida, así como un material preestablecido de la pieza de trabajo, y también del cuerpo de la línea de retardo. Sin embargo, esto no es un requisito obligatorio si se establecen requisitos menos exigentes en la precisión de la medición. Más adelante en el contexto del ejemplo de realización, se discutirá un ejemplo concreto.

Hasta ahora se ha asumido que, en el caso del transductor ultrasónico utilizado, se trata de un oscilador individual de una sola pieza. Sin embargo, de forma alternativa, el transductor ultrasónico puede tener también una mayoría de osciladores individuales controlables de forma independiente. En particular, dicha sonda de ensayo puede tener una forma que permita que la simetría rotacional según la presente invención pueda existir en la pieza de trabajo cuando, por ejemplo, los osciladores individuales estén controlados en fase por una unidad de control diseñada por separado. En dicha configuración, la superficie específica del cuerpo de la línea de retardo, a la que se acopla el transductor ultrasónico, no será a su vez un área plana, como se describió anteriormente.

En el marco de unos estudios amplios, se ha hecho evidente además que, independientemente de la forma de la superficie de transductor, pueden obtenerse ventajas comparables si el transductor ultrasónico de la sonda de ensayo tiene una mayoría de osciladores individuales controlables de forma independiente. Si se combina una sonda de ensayo que tenga dicho transductor ultrasónico segmentado con una unidad de control, que esté equipada para controlar los osciladores individuales del transductor ultrasónico de precisión de fase de modo que el campo ultrasónico generado por la sonda de ensayo después del acoplamiento en la pieza de trabajo sea prácticamente axisimétrico con respecto al haz central, con dicho dispositivo de ensayo podrán obtenerse a su vez las ventajas según la presente invención. La desviación descrita anteriormente del transductor ultrasónico bidimensional correspondiente respecto a una configuración plana también puede obtenerse, por ejemplo, mediante un control de precisión de fase equivalente de los osciladores individuales del transductor ultrasónico. El requisito previo para ello es únicamente un poder de resolución de tiempo suficiente de la unidad de control del dispositivo de ensayo. No obstante, como regla, el control de precisión de fase de los osciladores individuales del transductor ultrasónico no sustituye al ajuste descrito anteriormente de la línea circunferencial del transductor ultrasónico. En la mayoría de los casos, se requiere adicionalmente este ajuste para conseguir un perfil de haz axisimétrico en la pieza de trabajo.

Además, en otro desarrollo preferido, la unidad de control de un dispositivo de ensayo está equipada para controlar los osciladores individuales del transductor ultrasónico con precisión de fase, de modo que la dirección principal de la propagación del campo ultrasónico generado por la sonda de ensayo, es decir, la dirección del haz central, pueda variarse al menos en un plano, por ejemplo, en el plano de incidencia. Esta característica típica de la denominada “disposición en fase”, como es bien conocida en el estado de la técnica, también puede obtenerse con un dispositivo de ensayo según la presente invención. Como regla, la sonda de ensayo de dicho dispositivo de ensayo se forma de modo que, en el caso del control en fase de los osciladores individuales de la pieza de trabajo, se forma un campo de sonido con simetría rotacional cuya dirección principal de propagación se inclina hacia la normal de superficie en el punto de acoplamiento (= insonación angular). Pero este no es obligatoriamente el caso, también puede requerirse un control de precisión de fase (retardadas entre sí) de los osciladores individuales para una insonación angular en el ángulo de insonación deseado/preestablecido. Es entonces posible una modificación de este ángulo de insonación por medio de un control de fase conocido de los osciladores individuales.

- 5 En otro desarrollo preferido del dispositivo de ensayo, los osciladores individuales están dispuestos en forma de disposición bidimensional. Esto permite dar forma a la superficie específica del cuerpo de la línea de retardo, en la que se ubica el transductor ultrasónico, de forma plana, y realizar los ajustes necesarios para la generación de un haz ultrasónico que sea axisimétrico en la pieza de trabajo con respecto a la dirección principal de propagación, exclusivamente a través de un control de precisión de fase de los osciladores individuales de la disposición bidimensional. De este modo, este control de precisión de fase de los osciladores individuales será en general específico para el ángulo de insonación seleccionado.
- 10 En una realización preferida alternativa del dispositivo de ensayo, los osciladores individuales del transductor ultrasónico están dispuestos en forma de disposición lineal. De este modo, el eje longitudinal de la disposición lineal está dispuesto preferiblemente en el plano de insonación.
- 15 En una primera realización ventajosa, la superficie específica del cuerpo de la línea de retardo, en la que se ubica el transductor ultrasónico, tiene forma plana en la dirección del eje longitudinal de la disposición lineal. Para la generación de un perfil de haz axisimétrico en la pieza de trabajo, los osciladores individuales de la disposición se controlan con precisión de fase individualmente de forma específica para el ángulo de insonación seleccionado.
- 20 En una segunda realización ventajosa, la superficie específica del cuerpo de la línea de retardo, en la que se sitúa el transductor ultrasónico, tiene una forma en la dirección del eje longitudinal de la disposición lineal que se desvía respecto a la configuración plana, como ya se ha descrito anteriormente. Esto le permite conseguir el perfil de haz axisimétrico deseado en la pieza de trabajo para un ángulo de incidencia preestablecido, al menos en el plano de incidencia, también en el caso del control en fase de los osciladores individuales.
- 25 Para obtener un resultado óptimo con respecto a la simetría rotacional deseada en la pieza de trabajo, la forma del área del cuerpo de la línea de retardo que se desvía del plano, en la que se sitúa el transductor ultrasónico, se calcula perpendicular al plano de insonación, como se ha descrito anteriormente, y se realiza a través de un diseño/procesamiento adecuado de los materiales del cuerpo de la línea de retardo. Dado que el diseño de la superficie específica del cuerpo de la línea de retardo depende también del ángulo de insonación real, el diseño del cuerpo de la línea de retardo se optimiza de forma ventajosa, de modo que en el caso de un ángulo de insonación preestablecido se obtiene un perfil de haz axisimétrico. Este ángulo de insonación preestablecido puede darse, por ejemplo, directamente mediante un control en fase de todos los osciladores individuales de la disposición lineal.
- 30 Si en esta configuración el ángulo de insonación se modifica electrónicamente, por ejemplo, haciendo corresponder el control de precisión de fase de los osciladores individuales de la disposición, básicamente habría que optimizar de nuevo el diseño de la superficie de transductor del cuerpo de la línea de retardo que lleva la disposición para este ángulo alterado. Pero aquí se ha mostrado, de forma sorprendente, que las desviaciones del perfil del haz que se producen en la pieza de trabajo de la simetría rotacional deseada son tan pequeñas que una optimización del perfil del área perpendicular al plano de insonación para un (único) ángulo de insonación central lleva en la práctica, normalmente, a resultados satisfactorios. Puede adoptarse el cambio de la forma del transductor mediante distintos ángulos de dirección calculando las leyes de retardo correspondientes.
- 35 Como ya se ha explicado anteriormente, como regla, tanto el factor de acoplamiento del cuerpo de la línea de retardo y de la pieza de trabajo, así como la atenuación del sonido en el cuerpo de la línea de retardo (debido a las longitudes de recorrido variables en el cuerpo de la línea de retardo) dependen del ángulo de insonación. Esta influencia puede compensarse fácilmente en el caso de una sonda de ensayo de disposición en fase, ya que la amplitud de transmisión y/o la amplitud de recepción de los osciladores individuales de la disposición se ajustan individualmente.
- 40 Además, ha demostrado ser ventajosa una familia de sondas de ensayo de la misma frecuencia para el ensayo ultrasónico no destructivo de una pieza de trabajo, que incluye una primera sonda de ensayo, que se proporciona para la insonación en un primer ángulo de insonación, una segunda sonda de ensayo, que se proporciona para la insonación en un segundo ángulo de insonación, y una tercera sonda de ensayo, que se proporciona para la insonación en un tercer ángulo de insonación (los ángulos típicos son, por ejemplo, 45°, 60° y 70°). La familia de sondas de ensayo se caracteriza por que, en el campo cercano de todas las sondas de ensayo en la pieza de trabajo, el campo ultrasónico generado por una sonda de ensayo en la dirección del haz central concuerda prácticamente con el campo ultrasónico generado por las otras sondas de ensayo en la dirección de su haz central. Preferiblemente, todas las sondas de ensayo se proporcionan, de este modo, para la insonación angular. En particular, todas las sondas de ensayo corresponden preferiblemente a una sonda de ensayo según la presente invención según una o más de las realizaciones preferidas descritas anteriormente. Dicha familia de sondas de ensayo es especialmente adecuada para determinar el tamaño de un defecto en una pieza de trabajo mediante el método DGS según varios ángulos de insonación.
- 45 Se obtiene una aplicación especialmente simple de las sondas de ensayo de la familia de sondas de ensayo si la longitud de los recorridos del sonido en el material de ensayo en la dirección principal de propagación hasta el extremo del campo cercano concuerda prácticamente en el caso de todas las sondas de ensayo.
- 50
- 55
- 60
- 65

Se obtienen ventajas y características adicionales de las reivindicaciones secundarias así como de los ejemplos de realización que se explican en detalle más adelante sobre la base del dibujo. En este último

la Figura 1: muestra un diagrama esquemático de una configuración de ensayo,

la Figura 2: muestra una representación tridimensional de un transductor ultrasónico de una sonda de ensayo en la que se aprecia claramente la desviación de la línea circunferencial del transductor ultrasónico respecto a la configuración circular o rectangular aceptada hasta ahora,

la Figura 3: muestra un corte a través de la superficie de transductor del cuerpo de la línea de retardo, en la que se sitúa el transductor ultrasónico, en el plano de incidencia,

la Figura 4: muestra una representación a escala de la desviación de la línea de intersección de la Figura 3 respecto a una línea recta que representa una superficie plana del transductor conocida en el estado de la técnica,

la Figura 5 muestra un corte a través de esta área perpendicular al plano de incidencia,

la Figura 6: muestra una representación bidimensional de un transductor ultrasónico de una sonda de ensayo en la que se aprecia claramente la desviación de la línea circunferencial del transductor ultrasónico respecto a la configuración circular o rectangular aceptada hasta ahora,

la Figura 7: muestra una vista del transductor ultrasónico de una sonda de ensayo según un segundo ejemplo de realización,

la Figura 8: muestra una vista del transductor ultrasónico de una sonda de ensayo de un tercer ejemplo de realización, y

la Figura 9: muestra dos sondas de ensayo ilustrativas de una familia de sondas de ensayo.

Una configuración de ensayo 1 incluye una sonda 10 de ensayo que por su parte incluye un cuerpo 12 de la línea de retardo que puede fabricarse, por ejemplo, de Plexiglas®. En la configuración de ensayo mostrada, en el caso de la sonda 10 de ensayo se trata de una sonda de ensayo angular que se proporciona para generar un haz ultrasónico en una pieza 100 de trabajo que se inclina en un ángulo β hacia la normal de la superficie de entrada. De este modo, el cuerpo 12 de la línea de retardo tiene una superficie específica 14 de acoplamiento con la que el cuerpo 12 de la línea de retardo de la sonda 10 de ensayo se conecta a la superficie específica 102 de la pieza 100 de trabajo. Como regla, la superficie específica 14 de acoplamiento de la sonda 10 de ensayo se ajusta en su geometría a la geometría de la superficie específica 102 de la pieza de trabajo, como se conoce en el estado de la técnica.

Un transductor 20 ultrasónico adecuado se sitúa en una superficie 16 de transductor del cuerpo 12 de la línea de retardo de modo que se produzca un buen acoplamiento acústico del transductor ultrasónico 20 al cuerpo 12 de la línea de retardo. El transductor ultrasónico 20 puede consistir, por ejemplo, en una cerámica piezoeléctrica y estar adherida sobre la superficie 16 de transductor. La superficie 16 de transductor, está normalmente inclinada en un ángulo α hacia la normal de la superficie específica 102 de la pieza de trabajo. El transductor ultrasónico 20 se controla por medio de una unidad de control diseñada de forma separada, con la que esta última está conectada a través de una línea 56 de control. Por regla general, la unidad 50 de control incluye una pantalla 52 para la representación gráfica de las señales de eco registradas y, si es necesario, de los ajustes del dispositivo, que en parte pueden ajustarse a través de una mayoría de controles operativos 54. La unidad 50 de control está de este modo configurada con la técnica de pulso-eco para el control de la sonda 10 de ensayo. En particular, la unidad 50 de control puede proporcionarse para determinar el tamaño de un reflector en la pieza 100 de trabajo según el denominado método DGS y, si es necesario, para representarlo para el operador en la pantalla 52. Surgen ventajas especiales a este sentido si la unidad 50 de control corresponde a las especificaciones de las solicitudes de patente alemanas DE 10 2008 037 173, DE 10 2008 002 445 o DE 10 2008 002 450 así como de la US-5.511.425 del titular de la presente solicitud.

La Figura 2 muestra ahora una representación tridimensional de un transductor ultrasónico 20 optimizado en la que puede apreciarse claramente la desviación de la línea circunferencial 22 del transductor ultrasónico 20 respecto a la forma circular o rectangular ya conocida en el estado de la técnica como óptima. Sobre la base del perfil de haz con simetría rotacional requerido en la pieza de trabajo, se obtiene una extensión claramente mayor del transductor ultrasónico 20 en el plano de insonación que en el perpendicular al mismo. Además, de hecho, surge una línea circunferencial 22 simétrica al plano de incidencia que, sin embargo, no tiene simetría puntual con respecto al punto X del transductor o con respecto a un plano que cruce este punto perpendicular al plano de incidencia. La optimización se llevó a cabo para valores cercanos a la realidad, especialmente para una línea de retardo de 13,40 milímetros, un diámetro del transductor ultrasónico 20 circular con insonación perpendicular que sirve de punto de partida del cálculo de 13,00 milímetros, un ángulo de insonación de 60°, una frecuencia ultrasónica de 2 MHz, una velocidad del sonido en el cuerpo de la línea de retardo de 2,730 mm/microsegundo así como una velocidad del sonido en la pieza de trabajo de 3,255 mm/microsegundo. La codificación en una escala de grises del transductor representado es insignificante. Los tamaños característicos del transductor ultrasónico 20/sonda 10 de ensayo examinados aquí pueden extraerse de la siguiente tabla:

Insertar tabla AQUÍ

5 La Figura 3 muestra un corte a través de la superficie 16 de transductor del cuerpo 12 de la línea de retardo de una sonda 10 de ensayo, que se basa en un transductor 20 según la Figura 2, en donde el corte se realizó en el plano de insonación. El plano de insonación es definido por la dirección de propagación del sonido ultrasónico en la pieza de trabajo y por la normal de superficie en la superficie específica 102 de la pieza de trabajo en el punto de acoplamiento del sonido ultrasónico. La línea discontinua de la Figura 3 muestra el curso plano de la superficie 16' de transductor habitual en la técnica anterior; la línea continua indica el curso 16 de la superficie real. El punto indicado por X indica el punto de salida del haz central del transductor ultrasónico 20. Puede verse claramente que el punto X del transductor
10 ultrasónico 20 se encuentra en la línea continua, pero en ambos lados del punto X surgen desviaciones del curso de la superficie plana. De este modo, la línea que está perpendicular en el punto X en el transductor (no ilustrado) es el haz central en el cuerpo 12 de la línea de retardo, y su dirección determina el ángulo de insonación β según Snellius.

15 La Figura 4 muestra ahora el corte a través de la superficie 16 de transductor optimizada de la sonda 10 de ensayo según la Figura 3 en la representación aumentada (tras las transformaciones adecuadas de las coordenadas) en donde el eje y indica aquí la desviación de la forma del transductor calculada en milímetros a partir de un área plana. Como puede verse claramente, las desviaciones respecto al área plana se encuentran únicamente en el intervalo de fracciones de milímetro. Además, puede verse que, basándose en la superficie 16' idealizada de transductor plano, el curso optimizado de superficie de la superficie 16 de transductor puede describirse como en forma de S, es decir, la línea de corte representada
20 en la Figura 3, basada en la superficie 16' de transductor plano, incluye un máximo local, un mínimo local y un punto de inflexión que se encuentra entre los mismos. Tal diseño de la superficie 16 de transductor del cuerpo 12 de la línea de retardo puede realizarse, por ejemplo, de forma mecánica en la producción del cuerpo 12 de la línea de retardo.

25 La Figura 5 muestra ahora un corte a través de la superficie 16 de transductor optimizada de la sonda 10 de ensayo, según el ejemplo de realización descrito anteriormente, en una dirección perpendicular al plano de incidencia, llevado a cabo en el punto X ya definido anteriormente del transductor ultrasónico 20. Puede verse claramente el curso parabólico del contorno de la superficie en este corte, en el que las desviaciones del área plana están a su vez únicamente en el intervalo de fracciones de milímetro, pero llevan a un haz sonoro desenfocado.

30 La Figura 6 muestra una vista a escala del transductor ultrasónico 20 optimizado de la Figura 2, en donde la vista es perpendicular a la superficie 16 de transductor optimizado en el punto X.

35 Como ya se ha descrito en la insonación, el transductor ultrasónico 20 puede diseñarse como un oscilador individual. Sin embargo, también puede diseñarse de forma segmentada en forma de disposición lineal, en donde el transductor ultrasónico 20 está subdividido en una multitud de osciladores individuales 24 que tienen, por ejemplo, la misma anchura. Dicha disposición lineal puede verse en la Figura 7. Además, es posible diseñar el transductor ultrasónico 20 como una disposición bidimensional, como se muestra de forma ilustrativa en la Figura 8, para segmentos prácticamente de la misma anchura.

40 Por último, la Figura 9 muestra esquemáticamente un par de sondas 10 de ensayo en donde en el caso de la primera sonda 10.1 de ensayo se trata de una sonda de ensayo angular que se optimiza para un ángulo fijo de insonación $\beta = 45^\circ$, y en el que el transductor ultrasónico 20 se diseña de una pieza. En el caso de la segunda sonda 10.2 de ensayo, también se trata de una sonda de ensayo o de la insonación angular, pero esta vez para un ángulo fijo de insonación $\beta' = 60^\circ$. De este modo, las sondas de ensayo 10.1 y 10.2 se ajustan entre sí, de forma que los campos ultrasónicos generados por
45 estas en cada caso en la pieza de trabajo están prácticamente en consonancia al menos en el campo cercano y, de este modo, tienen preferiblemente simetría rotacional con respecto a su dirección de propagación principal respectiva. Se obtiene una manejabilidad especialmente sencilla de la familia de las sondas de ensayo, ya que los recorridos del sonido en el material hasta el extremo del campo cercano son prácticamente iguales en ambas sondas de ensayo 10.1 y 10.2. Los puntos indicados por X indican el punto en el que el haz central corta el transductor 20, 20' respectivo.

50

REIVINDICACIONES

1. Método de fabricación de una sonda (10) de ensayo para el ensayo ultrasónico no destructivo de una pieza de trabajo dada, en donde la sonda (10) de ensayo comprende un transductor ultrasónico (20) de un único elemento y un cuerpo (12) de la línea de retardo, y en donde la sonda (10) de ensayo se proporciona para la insonación angular ultrasónica en la pieza de trabajo, con las siguientes etapas:
 - a. Calcular una geometría tanto del transductor (20) ultrasónico de un único elemento como del cuerpo (12) de la línea de retardo con la limitación de proporcionar una sonda (10) de ensayo configurada para proporcionar un campo ultrasónico axisimétrico con respecto a su haz central después de acoplarse a la pieza de trabajo;
 - b. Proporcionar un transductor ultrasónico (20) de un único elemento con dicha geometría;
 - c. Proporcionar un cuerpo (12) de la línea de retardo con dicha geometría que comprenda una primera superficie específica (16) para unir el transductor ultrasónico (20) y una segunda superficie específica (14) para unir el cuerpo (12) de la línea de retardo a la pieza de trabajo, en donde la primera superficie específica (16) no es plana;
 - d. Unir el transductor ultrasónico (20) a la primera superficie específica (16) del cuerpo (12) de la línea de retardo para proporcionar un acoplamiento acústico entre el transductor ultrasónico (20) y el cuerpo (12) de la línea de retardo.
2. Método según la reivindicación 1, caracterizado por que la segunda superficie específica (14) del cuerpo (12) de la línea de retardo es curva.
3. Método según la reivindicación 1 caracterizado por que la línea circunferencial del transductor ultrasónico (20) no tiene simetría rotacional, en particular no es circular ni en forma de polígono regular.
4. Método según la reivindicación 1, caracterizado por que el diseño de la superficie específica (16) del cuerpo (12) de la línea de retardo, en la que se ubica el transductor ultrasónico (20), se selecciona de forma que exista un punto situado en la dirección principal de propagación en el que la diferencia del tiempo de recorrido entre el haz central y los haces marginales sea de $T/2$, en donde T es la duración del ciclo del sonido ultrasónico.
5. Método según la reivindicación 1, caracterizado por que la superficie específica (16) del cuerpo (12) de la línea de retardo, en la que se sitúa el transductor ultrasónico (20), tiene un contorno no lineal en el plano de insonación y en particular tiene un contorno en forma de S.
6. Método según la reivindicación 1, caracterizado por que la superficie específica (16) del cuerpo (12) de la línea de retardo, en la que se sitúa el transductor ultrasónico (20), se describe perpendicular al plano de insonación mediante una función que tiene un mínimo absoluto.
7. Método según la reivindicación 1, caracterizado por que la superficie (14) específica de acoplamiento del cuerpo (12) de la línea de retardo es plana o no plana.
8. Método de fabricación de un dispositivo de ensayo para el ensayo ultrasónico no destructivo de una pieza de trabajo dada, en donde el dispositivo de ensayo comprende una sonda (10) de ensayo y una unidad (50) de control, comprendiendo la sonda (10) de ensayo un transductor ultrasónico (20) y un cuerpo (12) de la línea de retardo, y en donde la sonda (10) de ensayo se proporciona para una insonación ultrasónica angular en la pieza de trabajo con las siguientes etapas:
 - a. Proporcionar la sonda (10) de ensayo
 - i. Proporcionando un transductor ultrasónico (20) que comprende una mayoría de osciladores individuales controlables de forma independiente;
 - ii. Proporcionando un cuerpo (12) de la línea de retardo que comprende una primera superficie específica (16) para unir el transductor ultrasónico (20) y una segunda superficie específica (14) para unir el cuerpo (12) de la línea de retardo a la pieza de trabajo;
 - iii. Uniendo el transductor ultrasónico (20) a la primera superficie específica (16) del cuerpo (12) de la línea de retardo para proporcionar un acoplamiento acústico entre el transductor ultrasónico (20) y el cuerpo (12) de la línea de retardo;
 - b. Proporcionar una unidad (50) de control equipada para controlar los osciladores individuales del transductor ultrasónico (20) con precisión de fase de modo que la sonda (10) de ensayo esté configurada para generar un campo ultrasónico, que se introduce angularmente en la pieza de trabajo y que tiene simetría rotacional respecto a su haz central después del acoplamiento a la pieza de trabajo.

9. Método según la reivindicación 8, caracterizado por que la unidad de control está equipada además para controlar los osciladores individuales del transductor ultrasónico (20) con precisión de fase de modo que la dirección principal de propagación del campo ultrasónico generado por la sonda (10) de ensayo puede variarse.
- 5 10. Método según la reivindicación 9, caracterizado por que la segunda superficie específica (14) del cuerpo (12) de la línea de retardo no es plana.
11. Método según la reivindicación 9, caracterizado por que los osciladores individuales del transductor ultrasónico (20) están dispuestos en forma de disposición lineal o de disposición bidimensional.
- 10 12. Método según la reivindicación 9, caracterizado por que la superficie del cuerpo (12) de la línea de retardo en la que se ubica el transductor ultrasónico (20), es plana.
- 15 13. Método según la reivindicación 12, caracterizado por que el eje longitudinal de la disposición lineal se encuentra en el plano de insonación.

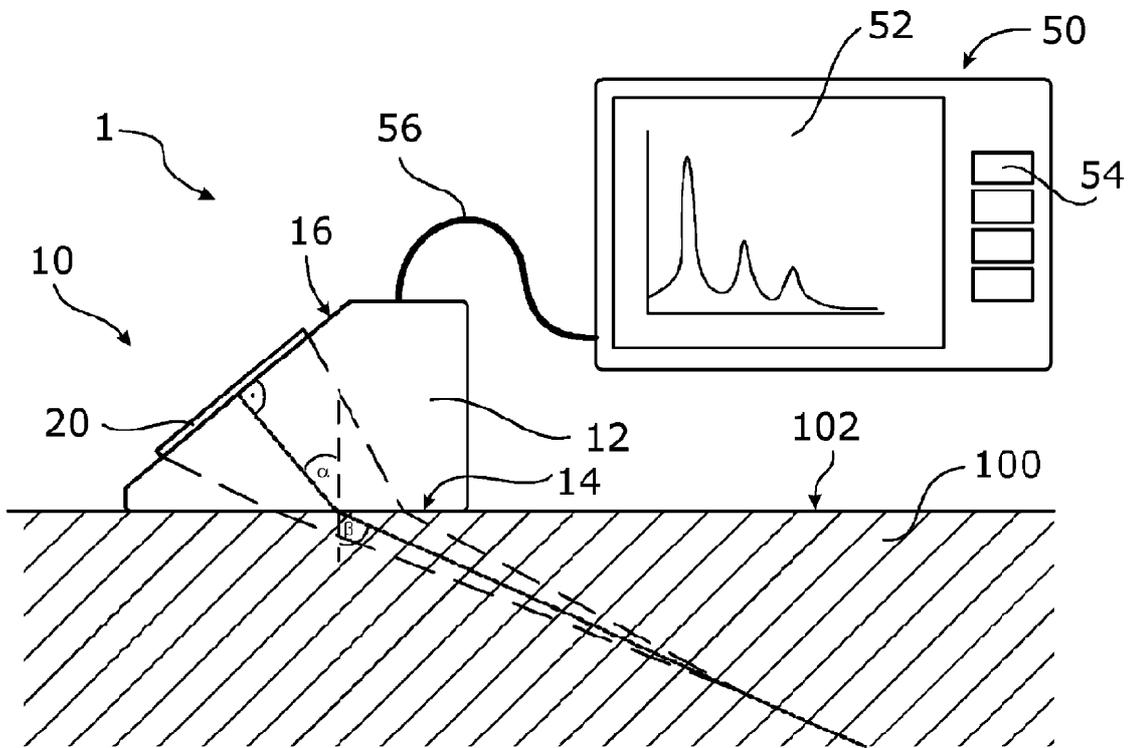


Fig. 1

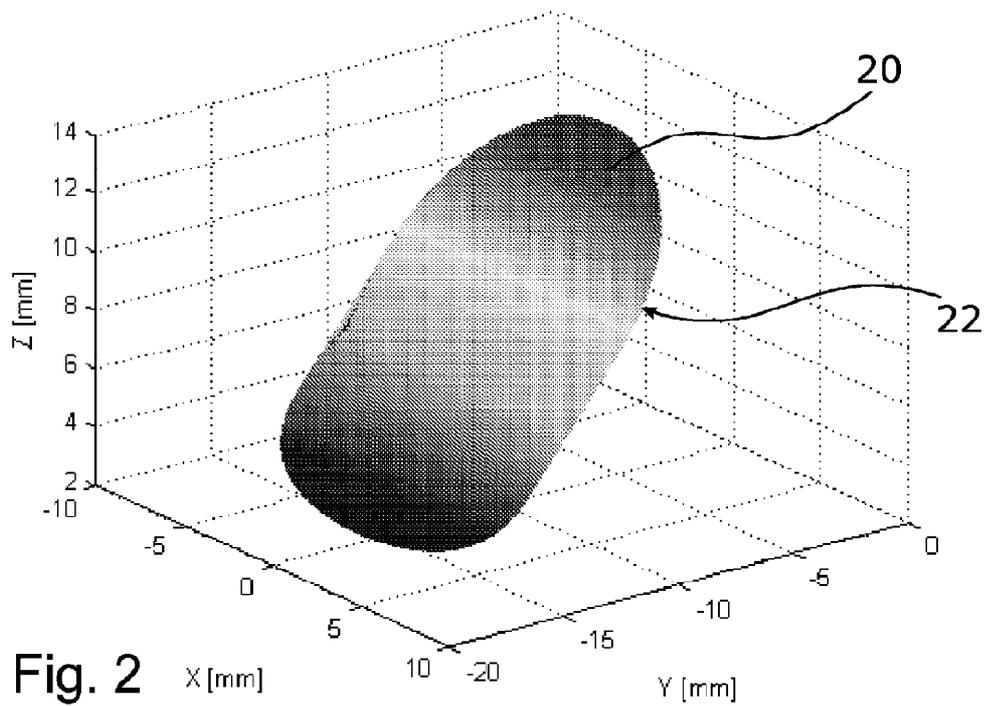


Fig. 2

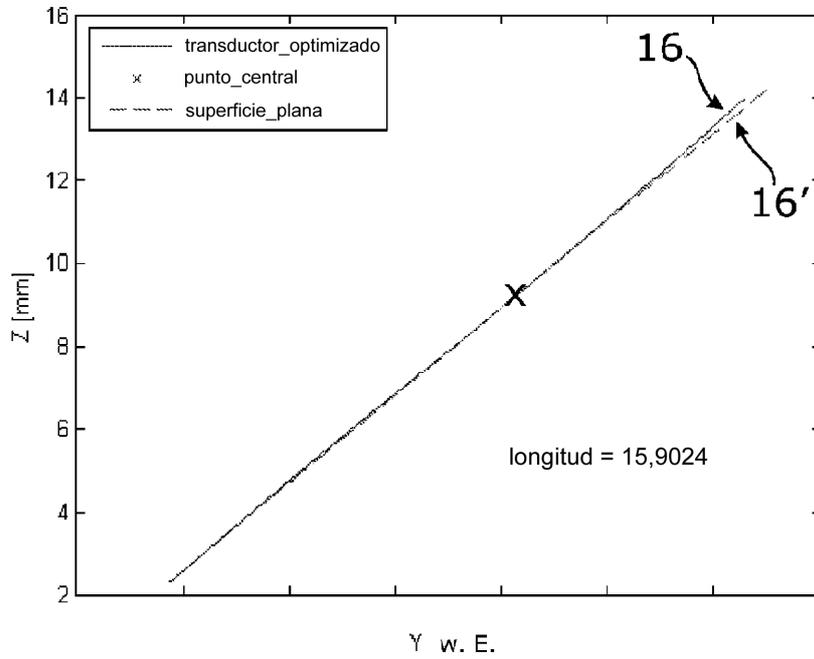


Fig. 3

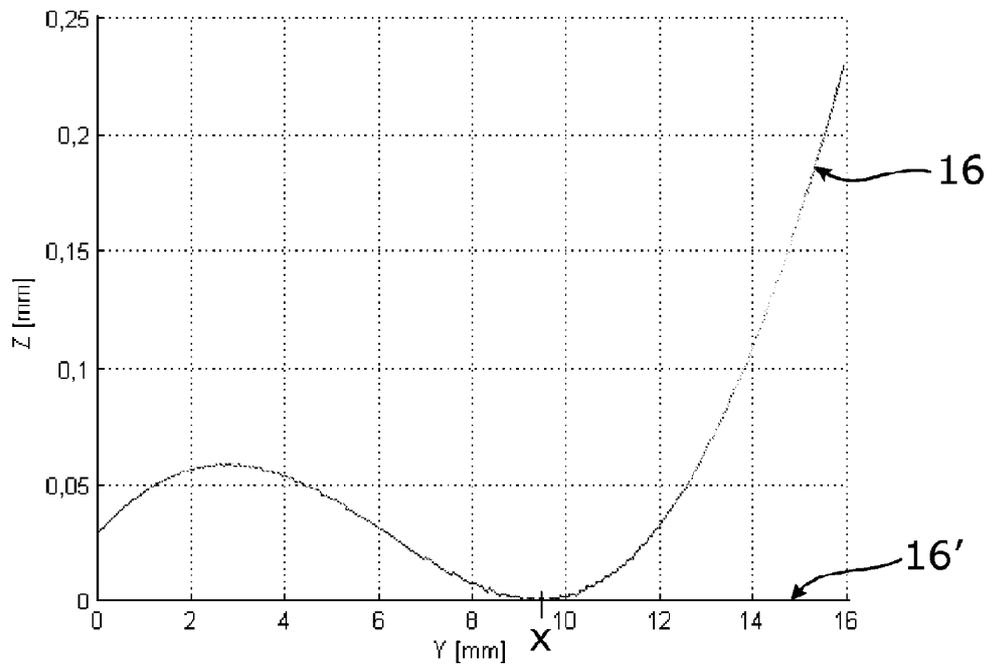


Fig. 4

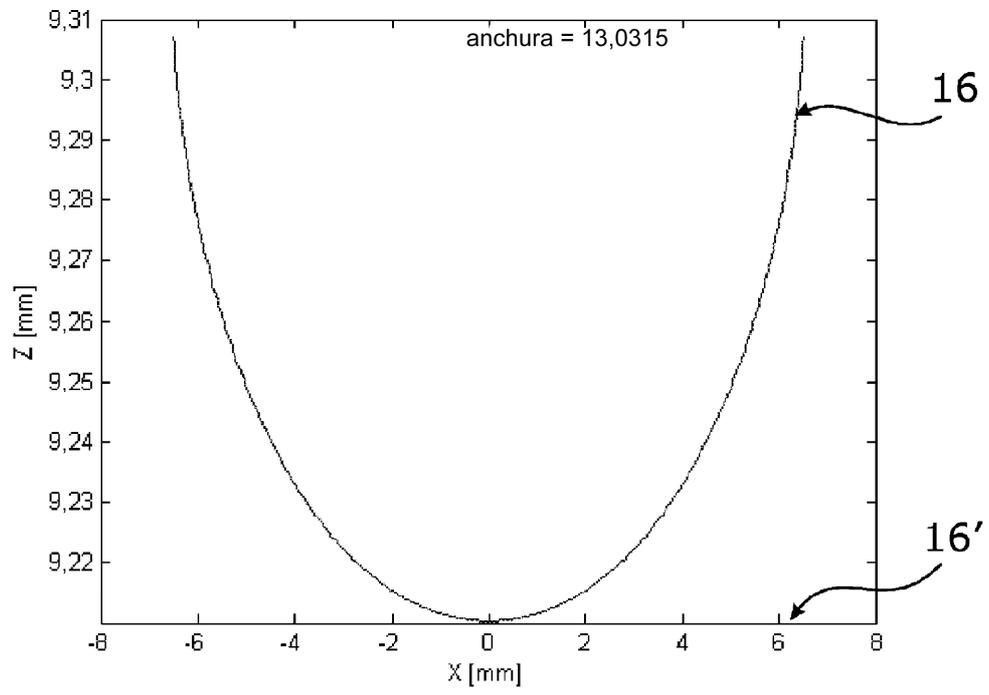


Fig. 5

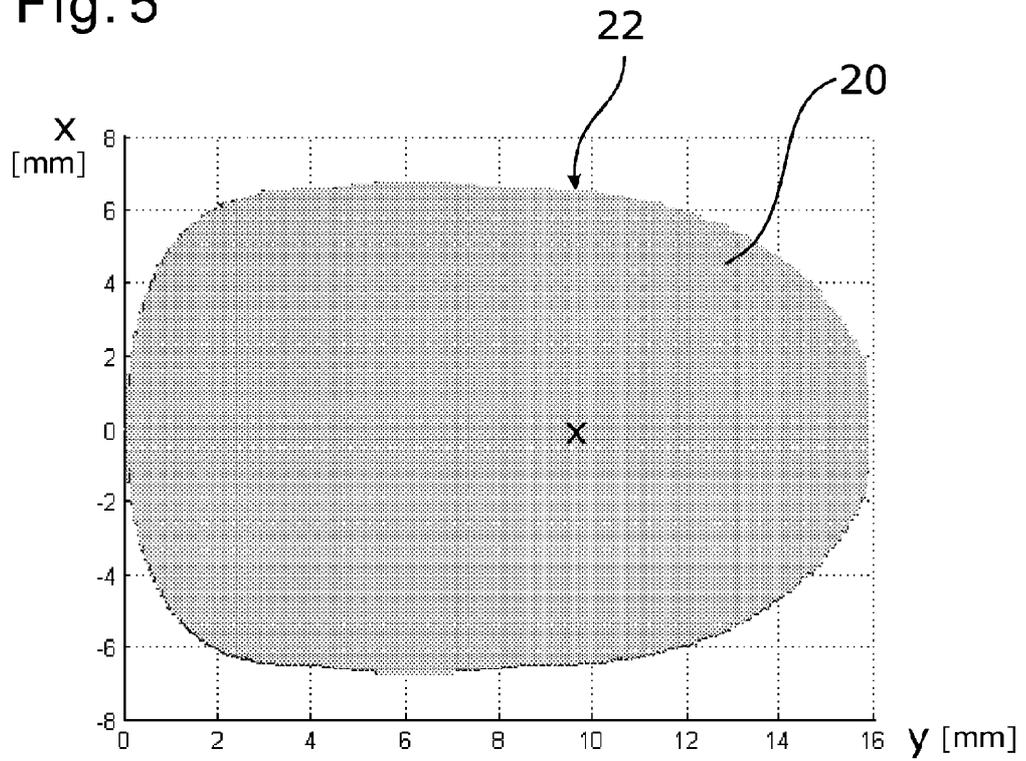


Fig. 6

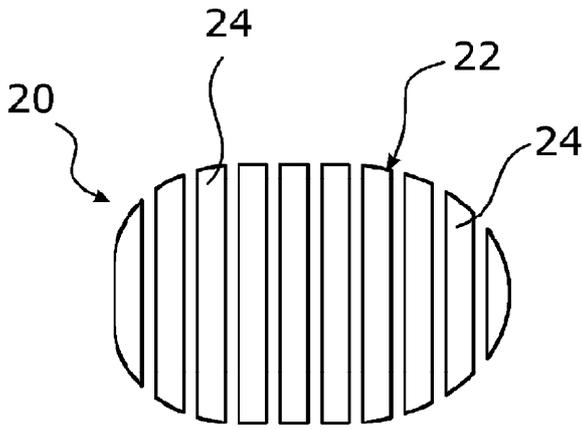


Fig. 7

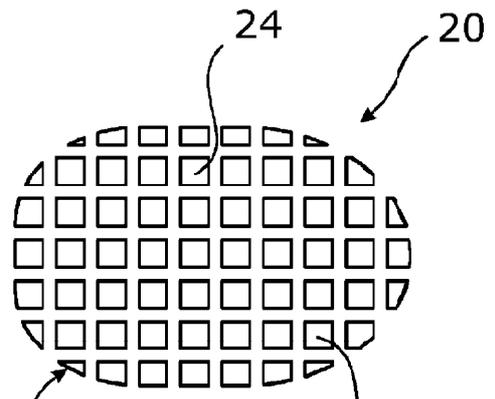


Fig. 8

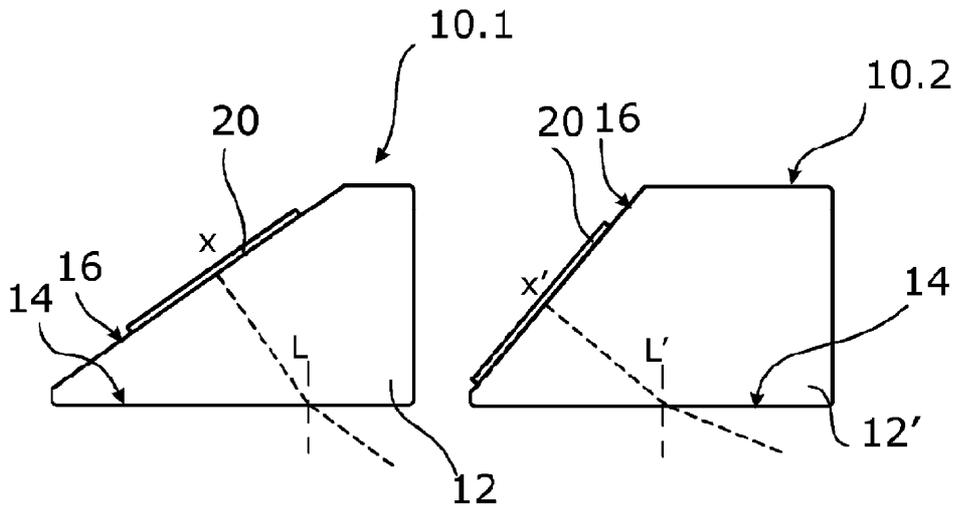


Fig. 9