

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 399 585**

51 Int. Cl.:

G01N 29/26

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.04.2009** **E 09733426 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.11.2012** **EP 2271927**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de control no destructivo por ultrasonidos con seguimiento de perfil de las piezas inspeccionadas**

30 Prioridad:

18.04.2008 FR 0852640

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

02.04.2013

73 Titular/es:

**EUROPEAN AERONAUTIC DEFENCE AND
SPACE COMPANY EADS FRANCE (100.0%)
37, Boulevard de Montmorency
75016 Paris, FR**

72 Inventor/es:

ITHURRALDE, GUILLAUME

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 399 585 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 y dispositivo de control no destructivo por ultrasonidos con seguimiento de perfil de las piezas inspeccionadas.

La presente invención pertenece al ámbito del control no destructivo por ultrasonidos de piezas de estructuras.

- 5 De modo más particular, la presente invención concierne al control no destructivo sin contacto de piezas en las cuales debe ser puesto en práctica un seguimiento de perfil, especialmente de piezas que comprenden caras no planas.

El control no destructivo, especialmente por ultrasonidos, se utiliza hoy día ampliamente, en particular durante la producción de piezas cuya calidad debe ser verificada como por ejemplo en la industria aeronáutica.

- 10 Un dispositivo de control no destructivo por ultrasonidos comprende en general al menos una sonda ultrasónica, que realiza una conversión de una señal, en general eléctrica, en una onda ultrasónica y viceversa.

- Un medio de acoplamiento, buen conductor de las ondas ultrasónicas, realiza una adaptación de impedancias acústicas entre la sonda ultrasónica y una pieza que hay que controlar. El medio de acoplamiento es generalmente un líquido, por ejemplo agua o a veces un gel. La adaptación de impedancias acústicas se asegura en general sumergiendo al menos parcialmente la sonda y la pieza en el medio de acoplamiento, o todavía por aportación continua del medio de acoplamiento entre la pieza y la sonda (como es el caso en las técnicas de inspección por chorro de agua).
- 15

- Las ondas ultrasónicas emitidas por la sonda en dirección a la pieza, denominadas « ondas incidentes », son en general parcialmente reflejadas al menos en las interfaces entre caras de la pieza y el medio de acoplamiento, y las ondas ultrasónicas reflejadas, denominadas « ecos », son recibidas por la sonda. Mediciones de características de los citados ecos permiten evaluar características estructurales de la pieza.
- 20

El control no destructivo por ultrasonidos se realiza en general con una dirección de propagación de las ondas incidentes normal a una cara delantera de la pieza, para asegurar una mejor tasa de penetración de las ondas incidentes en la pieza, especialmente en una pieza de material compuesto.

- Además, una incidencia normal a la cara delantera de la pieza permite tener direcciones de propagación de los ecos y de las ondas incidentes sensiblemente confundidas, lo que es ventajoso en el caso de una utilización en emisión/recepción de una sonda ultrasónica directiva, en la cual una ligera diferencia entre las direcciones de propagación de las ondas incidentes y de los ecos puede provocar una caída importante de los niveles de potencia medidos.
- 25

- La conservación de una dirección de propagación de las ondas incidentes sensiblemente normal en toda la inspección de la pieza se considera compleja en el caso de piezas cuya cara delantera no sea perfectamente plana (piezas de forma compleja, o piezas que comprendan defectos, o simplemente piezas de gran tamaño deformadas por gravedad), sobre todo cuando la sonda ultrasónica no está en contacto con la pieza.
- 30

- Para asegurar una incidencia sensiblemente normal de las ondas ultrasónicas sobre la cara delantera de la pieza, conviene realizar entonces un seguimiento de perfil de la citada cara delantera. Este seguimiento de perfil debe ser además rápido para asegurar cadencias importantes de inspección y no penalizar los ciclos de producción de las piezas.
- 35

Para realizar el seguimiento de perfil es conocido utilizar un autómatas que efectúa una adaptación de la orientación de la sonda ultrasónica en función de un archivo que describe la forma de la pieza, por ejemplo el archivo resultante de un diseño asistido por ordenador (o « CAO »).

- Si bien esta solución es interesante desde un punto de vista de velocidad de adaptación y de inspección, no es raro tener piezas cuya forma difiera del archivo CAO, por ejemplo piezas de gran tamaño deformadas por gravedad.
- 40

En el caso de una sonda ultrasónica directiva, es conocido adaptar a tientas la orientación de la citada sonda de modo que se optimice la potencia recibida, para cada posición de inspección de la sonda.

El inconveniente principal de esta solución es que este seguimiento de perfil es lento.

- El documento EP-A-0489161 describe un procedimiento de control no destructivo por ultrasonidos de una pieza, que utiliza una sonda ultrasónica que comprende al menos tres zonas de recepción no alineadas, cuyo procedimiento comprende una etapa de inspección en la cual son emitidas ondas ultrasónicas en al menos una posición de inspección de la citada sonda en dirección a una cara delantera de la pieza para delimitar características estructurales de la citada pieza, comprendiendo el procedimiento previamente una etapa de aprendizaje en la cual se miden al menos tres valores de tiempos de vuelo para al menos una posición de aprendizaje de la sonda para ondas ultrasónicas emitidas por la citada sonda, reflejadas por la cara delantera de la pieza y recibidas por las tres zonas de recepción no alineadas, y en cuyo dicho procedimiento, se calcula una estimación de una inclinación local de la cara delantera de la pieza en al menos en una posición de inspección en función de los tres valores de tiempos de vuelo
- 45
- 50

medidos, para corregir en la etapa de inspección la orientación de una dirección de propagación de las ondas ultrasónicas emitidas para asegurar un valor de un ángulo de incidencia sobre la cara delantera de la pieza sensiblemente igual a un valor predefinido deseado en al menos una posición de inspección.

5 Para resolver los problemas antes mencionados, un procedimiento de control no destructivo por ultrasonidos de una pieza, tal como el definido en la reivindicación 1, utiliza una sonda ultrasónica que comprende una pluralidad de zonas de recepción no todas alineadas, y de manera clásica comprende una etapa de inspección en la cual se emiten ondas ultrasónicas al menos en una posición de inspección de la citada sonda en dirección a una cara delantera de la pieza para determinar sus características estructurales.

10 De acuerdo con la invención, el procedimiento comprende una etapa de aprendizaje en la cual se miden al menos tres valores de tiempos de vuelo en al menos una posición de aprendizaje de la sonda para ondas ultrasónicas emitidas por la citada sonda, reflejadas por la cara delantera de la pieza y recibidas por un subconjunto de las zonas de recepción que comprende al menos tres zonas de recepción no alineadas, siendo el número de zonas de recepción utilizadas en la etapa de inspección para recibir ondas ultrasónicas reflejadas por la pieza superior al número de zonas de recepción del subconjunto utilizado en la etapa de aprendizaje. Se calcula una estimación de una inclinación local de la cara delantera de la pieza en al menos una posición de inspección en función de los al menos tres valores de tiempos de vuelo medidos, para corregir en la etapa de inspección la orientación de una dirección de propagación de las ondas ultrasónicas emitidas para asegurar un valor de un ángulo de incidencia sobre la cara delantera de la pieza sensiblemente igual a un valor predefinido deseado en al menos una posición de inspección.

20 Preferentemente, las ondas ultrasónicas son emitidas en la etapa de aprendizaje y/o la etapa de inspección por al menos una zona de emisión de la sonda de superficie igual o superior a la de cada zona de recepción.

En el caso en que la sonda comprenda una red matricial de al menos tres transductores elementales no alineados, cada zona de recepción y cada zona de emisión están constituidas por al menos un transductor elemental.

Para mejorar la precisión de las mediciones de los al menos tres valores de tiempo de vuelo, estos son medidos con zonas de recepción no adyacentes de la sonda.

25 Si la línea de mayor pendiente de las inclinaciones locales de la cara delantera de la pieza no es conocida, la estimación de la inclinación local en al menos una posición de inspección se obtiene estimando dos ángulos planos de inclinación local definidos en dos planos no paralelos entre sí y localmente ortogonales a la cara delantera de la pieza.

30 Preferentemente, se miden valores de tiempos de vuelo en una pluralidad de posiciones de aprendizaje y se miden al menos tres valores de tiempos de vuelo para cada posición de aprendizaje.

Si el procedimiento comprende una pluralidad de posiciones de inspección, se calcula una estimación de la inclinación local para cada posición de inspección, ya sea por interpolación o extrapolación de estimaciones de inclinaciones locales calculadas para diferentes posiciones de aprendizaje, o bien en función de al menos tres valores de tiempos de vuelo medidos en al menos dos posiciones de aprendizaje diferentes.

35 De acuerdo con la invención, un dispositivo de control no destructivo por ultrasonidos de una pieza, comprende una sonda ultrasónica que comprende una red matricial de transductores elementales que determinan una pluralidad de zonas de recepción no todas alineadas, medios mecánicos aptos para orientar la dirección de propagación de las ondas ultrasónicas emitidas por la sonda y para desplazar la citada sonda con respecto a la pieza, y medios de mando de los citados medios mecánicos.

40 El dispositivo comprende igualmente:

- medios de cálculo de estimaciones de inclinaciones locales de una cara delantera de la pieza en función de valores de tiempos de vuelo medidos en el transcurso de un aprendizaje previo de la cara delantera de la pieza para ondas ultrasónicas emitidas por la sonda y recibidas por un subconjunto de zonas de recepción que comprende al menos tres zonas de recepción no alineadas,

45 - medios de almacenamiento de las estimaciones de las inclinaciones locales.

En el transcurso del control no destructivo de las características estructurales de la pieza, los medios de mando orientan la sonda en función de las estimaciones de las inclinaciones locales memorizadas en los medios de almacenamiento y utilizan un número de zonas de recepción superior al número de zonas de recepción del subconjunto utilizado en el transcurso del aprendizaje previo.

50 Preferentemente, el corte de la red matricial de la sonda ultrasónica es de forma sensiblemente rectangular o cuadrada. Además, cada transductor elemental es de forma rectangular, hexagonal o circular.

La descripción que sigue de modos de realización de la invención se hace refiriéndose a las figuras que representan de manera no limitativa:

- Figura 1: una vista esquemática de un dispositivo de control no destructivo por ultrasonidos en inmersión,
- Figura 2: una vista esquemática de una sonda utilizada en el procedimiento de control no destructivo de acuerdo con la invención,
- 5 - Figuras 3a, 3b: vistas esquemáticas de secciones de la sonda de la figura 2 y de una pieza en dos planos de sección diferentes, que ilustran notaciones utilizadas en la descripción,
- Figura 3c y 3d: vistas esquemáticas en el plano de sección de la figura 3a después de la corrección de la orientación de la sonda,
- Figura 4: una vista esquemática de una sección de la sonda de la figura 2 y de la pieza, en el caso de zonas de emisión de superficies superiores a las de zonas de recepción,
- 10 - Figura 5: una vista esquemática de una red matricial de transductores elementales, que muestra zonas de recepción utilizadas para estimar el perfil de la pieza inspeccionada, de acuerdo con un modo de puesta en práctica del procedimiento de la invención,
- Figura 6: una vista esquemática de una red matricial de transductores elementales, que muestra zonas de emisión y de recepción utilizadas para realizar una medición elemental,
- 15 - Figuras 7a, 7b, 7c y 7d: vistas esquemáticas de redes matriciales de transductores elementales de acuerdo con diferentes modos de realización.

La presente invención concierne a un procedimiento de control no destructivo por ultrasonidos de piezas, especialmente de piezas que comprenden caras no planas, y a un dispositivo particularmente adaptado para la puesta en práctica del citado procedimiento.

- 20 Un procedimiento de control no destructivo por ultrasonidos utiliza al menos una sonda 1 ultrasónica, para emitir ondas ultrasónicas en dirección a una pieza 2 de la que se desea determinar características estructurales tales como un espesor, una tasa de porosidad, la presencia de defectos, etc.

- 25 El espacio que separa la sonda 1 de la pieza 2 que hay que controlar está ocupado generalmente por un medio de acoplamiento 3 buen conductor de las ondas ultrasónicas. Por ejemplo, la pieza 2 y la sonda 1 están colocadas en el interior de una cubeta 4 que rellena el medio de acoplamiento 3, tal como está representado en la figura 1.

El procedimiento comprende de manera clásica una etapa de inspección, en la cual se emiten ondas ultrasónicas por la sonda 1 en dirección a la pieza 2 en una pluralidad de posiciones de la citada sonda en el espacio, denominadas « posiciones de inspección ».

- 30 Una parte de la energía de las ondas incidentes es reflejada en las interfaces entre partes de impedancias acústicas diferentes, especialmente en interfaces entre el medio de acoplamiento 3 y todas las caras de la pieza de las cuales una cara delantera 21 correspondiente a la cara de la pieza 2 más próxima a la sonda 1, y eventualmente en interfaces internas a la citada pieza.

Las características estructurales de la pieza 2 son evaluadas a partir de características de las ondas ultrasónicas reflejadas o ecos, tales como valores de intensidad o tiempos de propagación.

- 35 Una dirección de propagación D de las ondas ultrasónicas corresponde a la dirección principal de un haz formado por las ondas ultrasónicas.

La dirección de propagación D de las ondas incidentes se orienta preferentemente en cada posición de inspección de modo que sea sensiblemente normal a una superficie apuntada en la citada cara delantera.

- 40 Deberá observarse que, aunque en lo que sigue de la exposición lo único que se describa es el caso de una incidencia normal de las ondas incidentes, el procedimiento de acuerdo con la invención es igualmente aplicable cuando direcciones de propagación de las ondas incidentes deban ser oblicuas, y cuya oblicuidad buscada es conocida a priori para cada superficie apuntada.

- 45 Para realizar el control no destructivo por ultrasonidos, la sonda 1 no está en contacto con la cara delantera 21 de la pieza 2. Es deseable adaptar la orientación de la dirección de propagación D de las ondas incidentes en función de las inclinaciones locales de las superficies apuntadas con respecto a superficies apuntadas teóricas ortogonales a las direcciones de propagación de las ondas ultrasónicas, lo que supone determinar previamente las citadas inclinaciones locales.

- 50 De acuerdo con la invención, la sonda 1 comprende una red matricial que dispone de al menos tres zonas de recepción diferentes que no están alineadas, y comprende una etapa de aprendizaje del perfil de la cara delantera 21 de la pieza 2, ejecutada antes de la etapa de inspección en cada pieza inspeccionada.

Cada zona de recepción, realizada por ejemplo en un material piezoeléctrico, es preferentemente poco directiva para permitir recibir ondas reflejadas que tengan una dirección de propagación diferente de la dirección de propagación D debido al hecho de las inclinaciones locales de la cara delantera 21 de la pieza 2. Éste es por ejemplo el caso si las dimensiones de cada zona de recepción son pequeñas con respecto a las longitudes de onda de las ondas ultrasónicas consideradas en el medio de acoplamiento 3.

En el transcurso de la etapa de aprendizaje, se emiten ondas ultrasónicas en dirección a la pieza 2 en una pluralidad de posiciones de la sonda 1 con respecto a la citada pieza, denominadas « posiciones de aprendizaje ».

La orientación de la sonda 1 en cada posición de aprendizaje se determina ventajosamente para minimizar los valores de las inclinaciones locales buscadas, en función de informaciones conocidas a priori sobre la forma de la pieza 2, por ejemplo accesibles en un archivo de diseño asistido por ordenador que representa la citada pieza o, en el caso de una inspección de una serie de piezas semejantes, informaciones obtenidas para una o unas piezas de la serie.

La etapa de aprendizaje se basa en la medición de tiempos de vuelo, es decir de tiempo de propagación, entre la emisión de ondas ultrasónicas y la recepción de ecos correspondiente a la reflexión de las ondas ultrasónicas sobre la cara delantera 21 de la pieza 2.

En cada posición de aprendizaje, se miden al menos tres valores de tiempos de vuelo para ecos recibidos por zonas de recepción diferentes y no alineadas, con una orientación constante y conocida de la sonda.

A partir de los al menos tres valores de tiempos de vuelo por posición de aprendizaje, se estiman por operaciones trigonométricas las inclinaciones locales de las superficies apuntadas durante la etapa de inspección, supuestas de curvatura despreciable a la escala de las distancias entre las zonas de recepción consideradas, para corregir en el transcurso de la etapa de inspección la orientación de las direcciones de propagación de las ondas ultrasónicas para cada posición de inspección.

Con un objetivo de simplificación, en un primer tiempo se describen las operaciones efectuadas durante la etapa de aprendizaje en el caso de una sonda 1, representada en la figura 2, que utiliza una red matricial 11 simple provista de tres superficies activas S_1 , S_2 y S_3 , disponiendo cada superficie activa de una zona de emisión de las ondas ultrasónicas respectivamente ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_3 , y de una zona de recepción respectivamente ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 .

Las superficies activas S_1 y S_2 están dispuestas según un eje x, y las superficies activas S_1 y S_3 están dispuestas según un eje y secante con el eje x, ventajosamente ortogonal al eje x, y que forma con el citado eje x un plano P de la citada red matricial. La dirección de propagación D de las ondas ultrasónicas emitidas por cada zona de emisión ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 es ortogonal al plano P.

Las figuras 3a y 3b representan parcialmente la sonda 1 y la pieza 2 en planos de sección P_x y P_y ortogonales al plano P y que contienen respectivamente al eje x y al eje y, en el caso de zonas de emisión confundidas con las zonas de recepción.

La inclinación local de una superficie apuntada de la cara delantera 21 queda definida en un plano de incidencia P_i , ortogonal con la citada superficie apuntada y que contiene la dirección de propagación D, por un ángulo entre el plano P y una intersección del plano de incidencia P_i con la superficie apuntada.

El plano de incidencia P_i no es en general conocido, y la inclinación local queda definida de manera equivalente por dos ángulos planos tomados en dos planos paralelos. En los planos P_x y P_y , la inclinación local está definida por un ángulo i_x entre el plano P y una intersección del plano P_x con la superficie apuntada, y por un ángulo i_y entre el plano P y una intersección del plano P_y con la superficie apuntada.

La zona de emisión ϵ_1 de la superficie activa S_1 emite un haz divergente de ondas ultrasónicas que son reflejadas por la cara delantera 21, y en parte recibidas por la zona de recepción ρ_1 . Se mide un tiempo de vuelo t_1 para el primer eco detectado, que corresponde a la onda ultrasónica reflejada que ha recorrido la distancia más corta.

De modo similar, se miden tiempos de vuelo t_2 y t_3 a partir de los ecos recibidos por las zonas de recepción ρ_2 y ρ_3 .

A partir de las mediciones de los tiempos de vuelo t_1 , t_2 y t_3 , se determina una estimación $\theta = (\theta_x, \theta_y)$ de la inclinación local de la superficie apuntada para la posición de aprendizaje considerada calculando una estimación $\theta_x = \theta_{x(1-2)}$ del ángulo i_x y una estimación $\theta_y = \theta_{y(1-3)}$ del ángulo i_y .

Se calcula un valor $\Delta t_{e_{x12}}$ de una diferencia de tiempo de vuelo $\Delta t_{x12} = t_1 - t_2$ a partir de las mediciones de los tiempos de vuelo t_1 y t_2 , y se calcula la estimación θ_x según la expresión:

$$\theta_x = \theta_{x(1-2)} = \text{asen}[\Delta t_{e_{x12}} \times v_{e1}] / (2 \times d_{e12})] \quad (1)$$

donde $\text{asen}(\varphi)$ corresponde a la función arcsen recíproca de la función seno, d_{12} es un valor de una distancia d_{12} entre los centros de las zonas de recepción p_1 y p_2 y v_{e1} es un valor de una velocidad de propagación v_1 de las ondas ultrasónicas en el medio de acoplamiento 3, siendo los valores d_{12} y v_{e1} valores teóricos o valores medidos.

- 5 De la misma manera, calculando a partir de las mediciones de los tiempos de vuelo t_1 y t_3 un valor $\Delta t_{e_{y13}}$ de una diferencia de tiempo de vuelo $\Delta t_{y13} = t_1 - t_3$, y considerando un valor d_{13} de la distancia d_{13} entre los centros de las zonas de recepción p_1 y p_3 , la estimación θ_y es determinada según la expresión:

$$\theta_y = \theta_{y(1-3)} = \text{asen}[\Delta t_{e_{y13}} \times v_{e1} / (2 \times d_{13})] \quad (2)$$

La figura 4 representa parcialmente la sonda 1 y la pieza 2, en el plano Px, en el caso en que las zonas de emisión tengan superficies sensiblemente superiores a las de las zonas de recepción.

- 10 En este caso, los haces de ondas ultrasónicas emitidos son sensiblemente directivos según la dirección de propagación D de las ondas ultrasónicas que es ortogonal al plano P de la red matricial 11.

La diferencia de tiempos de vuelo Δt_{x12} es igual a $\Delta t_{x121} + \Delta t_{x122}$, donde Δt_{x121} corresponde a la diferencia de tiempo de propagación de las ondas incidentes para llegar a la cara delantera 21, y Δt_{x122} corresponde a la diferencia de tiempo de propagación entre los ecos para llegar a las zonas de recepción p_1 y p_2 .

- 15 El ángulo i_x verifica las expresiones siguientes:

$$\text{sen}(i_x) = (\Delta t_{x121} \times v_1) / (2 \times d_{12}) \quad (3a)$$

$$\text{tg}(i_x) = (\Delta t_{x122} \times v_1) / (2 \times d_{12}) \quad (3b)$$

- 20 Este tipo de transductor elemental es utilizado para piezas en las cuales se sabe a priori que los valores de las inclinaciones locales son pequeños. Debido a esto, las funciones seno y tangente, para calcular la estimación θ_x , son aproximadas por su desarrollo limitado en cero, y $\text{sen}(\varphi) \cong \text{tg}(\varphi) \cong \varphi$. Debido a esto, $\Delta t_{x121} \cong \Delta t_{x122} \cong \Delta t_{x12}/2$.

Considerando las ecuaciones (3a) y (3b), la estimación θ_x es calculada según la expresión:

$$\theta_x = \theta_{x(1-2)} = (\Delta t_{e_{x12}} \times v_{e1}) / (4 \times d_{e12}) \quad (4)$$

En el caso de una red matricial que disponga de más de tres zonas de recepción distintas, no es necesario, aunque no está excluido, medir tiempos de vuelo para cada zona de recepción en la etapa de aprendizaje.

- 25 Preferentemente, en recepción solo se utiliza un subconjunto de las zonas de recepción para la medición de los tiempos de vuelo asociados. Este subconjunto de zonas de recepción comprende un número de zonas de recepción inferior al número de zonas de recepción utilizadas en el transcurso de la etapa de inspección, para reducir la duración de la etapa de aprendizaje con respecto a la duración de la etapa de inspección y/o reducir la cantidad de datos que hay que memorizar. Preferentemente, todas o parte de las zonas de recepción utilizadas en la etapa de aprendizaje son utilizadas igualmente en la etapa de inspección.

Es ventajoso además considerar zonas de recepción no adyacentes, es decir zonas de recepción separadas por otras zonas de recepción, a fin de mejorar la precisión relativa de las diferencias de tiempo de vuelo y de las diferentes estimaciones de ángulos de corrección.

- 35 En la figura 5, se ha representado una red matricial 11a que dispone de 64 transductores elementales C_1 a C_{64} que forman una red rectangular densa que comprende 16 líneas (paralelas al eje x) y 4 columnas (paralelas al eje y), comprendiendo la línea p los transductores elementales C_{1+4p} , C_{2+4p} , C_{3+4p} y C_{4+4p} , $0 < p < 15$, pudiendo ser utilizado cada transductor elemental en emisión y en recepción.

Cada zona de recepción está constituida por al menos un transductor elemental.

- 40 Cada zona de emisión está constituida igualmente por al menos un transductor elemental; en un modo particular de puesta en práctica, cada zona de emisión comprende al menos tantos transductores elementales como una zona de recepción asociada.

En el caso en que cada zona de recepción esté constituida por un transductor elemental, las zonas de recepción utilizadas para la medición de tiempos de vuelo en la etapa de aprendizaje son por ejemplo los transductores elementales C_1 , C_4 , C_{13} , C_{16} , C_{25} , C_{28} , C_{37} , C_{40} , C_{49} , C_{52} , C_{61} y C_{64} (rayados en la figura 5).

- 45 En este caso es ventajoso calcular estimaciones θ_x y θ_y cuyos valores sean iguales a medias de varias estimaciones de los ángulos respectivamente i_x e i_y .

En el ejemplo considerado en la figura 5, se calculan las estimaciones siguientes:

- $\theta_{x(12k+1); 12k+4}$ para los transductores elementales C_{12k+1} y C_{12k+4} , $0 \leq k \leq 5$,

- $\theta_{y(12l+1; 12l+13)}$ y $\theta_{y(12l+4; 12l+16)}$ para los transductores elementales C_{12l+1} y C_{12l+13} , por una parte, y C_{12l+4} y C_{12l+16} por otra, $0 \leq l \leq 4$,

Las estimaciones θ_x y θ_y se calculan según las expresiones:

$$\theta_x = 1/6 \times \sum_{k=0}^5 [\theta_{x(12k+1; 12k+4)}] \quad (5a)$$

$$\theta_y = 1/10 \times \sum_{l=0}^4 [\theta_{y(12l+1; 12l+13)} + \theta_{y(12l+4; 12l+16)}] \quad (5b)$$

deberá observarse que, en la etapa de aprendizaje, los tiempos de vuelo se miden emitiendo ondas ultrasónicas ya sea secuencialmente, o bien simultáneamente.

Si los tiempos de vuelo se miden simultáneamente, preferentemente se emite con una sola zona de emisión formada por todos los transductores elementales.

En el caso en que los tiempos de vuelo se midan secuencialmente, son posibles varias variantes:

- emitir con una zona de emisión confundida con la zona de recepción considerada; esta variante corresponde al modo preferido de puesta en práctica especialmente en el caso de desorientaciones importantes,
- emitir con una zona de emisión de superficie superior a la superficie de la zona de recepción considerada (por ejemplo emitir con una pluralidad de transductores elementales si la zona de recepción consiste en un transductor elemental),
- emitir con una zona de emisión constituida por todos los transductores elementales de la sonda 1, ya sea simultáneamente, o bien con retardos que generen un frente de onda divergente.

El número y la posición en la red matricial de las zonas de recepción utilizadas para medir tiempos de vuelo no están limitados al ejemplo descrito, dado que es necesario medir al menos tres tiempos de vuelo por posición de aprendizaje, con zonas de recepción no alineadas.

En el caso general de una pluralidad de posiciones de aprendizaje y de una pluralidad de posiciones de inspección, se miden al menos tres tiempos de vuelo para cada posición de aprendizaje.

Si las posiciones de aprendizaje y las posiciones de inspección son idénticas, se determinan estimaciones locales de la cara delantera 21 como se describió anteriormente para cada posición de aprendizaje/adquisición.

En la práctica, el número de posiciones de aprendizaje es preferentemente inferior al número de posiciones de inspección, esencialmente por razones de rapidez de ejecución de la etapa de aprendizaje. En este caso, las citadas posiciones de aprendizaje son preferentemente un subconjunto de las posiciones de inspección, pero no necesariamente.

Son posibles entonces varias variantes para estimar la inclinación local de la cara delantera 21 para una posición de inspección no confundida con una posición de aprendizaje, de las que algunas se describen seguidamente, de manera no limitativa.

En un primer modo de puesta en práctica, la estimación de la inclinación local para la posición de inspección considerada se calcula por la interpolación o extrapolación de las estimaciones de las inclinaciones locales para todas las posiciones de aprendizaje o justo las más próximas a la citada posición de inspección considerada.

En otro modo de puesta en práctica, la estimación de la inclinación local para la posición de inspección considerada se determina en función de al menos tres valores de tiempos de vuelo medidos en al menos dos posiciones de aprendizaje, preferentemente las más próximas a la posición de inspección considerada, no estando las zonas de recepción concernidas alineadas, calculando expresiones semejantes a las descritas precedentemente.

El control no destructivo de las características estructurales de la pieza 2 se realiza a continuación en el transcurso de la etapa de inspección.

Durante la etapa de inspección, se emiten ondas ultrasónicas para las posiciones de inspección de la sonda 1, corrigiendo la orientación de las direcciones de propagación de las ondas incidentes en función de las estimaciones de las inclinaciones locales de la cara delantera 21 de la pieza 2.

En la figura 3c está representado un ejemplo de corrección para el caso representado en la figura 3a. En este caso, la corrección de orientación en el plano Px se realiza inclinando el eje x de la red matricial 11 un ángulo igual a la

estimación θ_x , de modo que las ondas ultrasónicas tengan una incidencia sensiblemente normal sobre la cara delantera 21 de la pieza 2 en el citado plano Px.

Como está ilustrado en la figura 3c, la superficie apuntada después de la corrección angular, sensiblemente centrada en un punto 21b, está desplazada con respecto a la superficie apuntada sin la citada corrección, sensiblemente centrada en un punto 21a. Si es necesario, en un modo particular se pone en práctica igualmente una corrección de la posición de la sonda 1 en el espacio aplicando procedimientos conocidos de modo que la superficie apuntada después de la corrección esté sensiblemente confundida con la superficie apuntada antes de la corrección, tal como está representado en la figura 3d.

En el transcurso de la etapa de inspección, es preferible utilizar zonas de emisión con superficies superiores a las de las zonas de recepción. Deberá observarse que las zonas de emisión y de recepción utilizadas en la etapa de inspección pueden diferir de las utilizadas en la etapa de aprendizaje. En particular, en la etapa de inspección, se utiliza ventajosamente un número de zonas de recepción más importante para tener una mejor resolución espacial.

Por ejemplo cada zona de emisión está constituida por varios transductores elementales y cada zona de recepción está constituida por un número inferior de transductores elementales.

La utilización de superficies más grandes en emisión que en recepción permite ser más directivo en emisión (mejora de la precisión de la inspección) que en recepción (menos sensible a las inclinaciones locales residuales).

Como está ilustrado en la figura 6 en el caso de la red 11a de la figura 5, una zona de emisión está constituida por ejemplo por nueve transductores elementales ($C_1, C_2, C_3, C_5, C_6, C_7, C_9, C_{10}$ y C_{11} rayados a 45° y -45° en la figura) y una zona de recepción comprende un solo transductor elemental en el centro de recepción (C_6 , rayado a $+45^\circ$ únicamente) para una medición elemental. Sin desplazar la sonda se obtienen mediciones considerando sucesivamente (o simultáneamente) zonas de recepción correspondientes a todos los transductores elementales que no se encuentran en el borde de la citada red. El número de zonas de recepción es en este ejemplo igual a 28, y es superior al número de zonas de recepción utilizadas en el transcurso de la etapa de aprendizaje en el ejemplo representado en la figura 5 (igual a 12).

Deberá observarse que el modo preferido de puesta en práctica del procedimiento consiste en ejecutar la etapa de aprendizaje en todas las posiciones de aprendizaje, y en ejecutar después la etapa de inspección en todas las posiciones de inspección. Otro modo de puesta en práctica consiste, especialmente en el caso en que las posiciones de aprendizaje y las posiciones de inspección estén confundidas, en ejecutar sucesivamente las etapas de aprendizaje y de inspección en cada posición de aprendizaje/inspección.

Para poner en práctica el procedimiento de acuerdo con la invención, se utiliza ventajosamente un dispositivo, representado en la figura 1, que comprende la sonda 1 que utiliza una red matricial de al menos tres transductores elementales no alineados, un aparato 8 de generación de los impulsos eléctricos de excitación de la sonda y de acondicionamiento de las señales recibidas, medios mecánicos 5 aptos para orientar la dirección de propagación D de las ondas ultrasónicas emitidas por la sonda 1 y para desplazar la citada sonda con respecto a la pieza 2, y medios de mando 60 de los citados medios mecánicos.

El dispositivo comprende igualmente medios de cálculo 61 (un microcontrolador, etc) de las estimaciones θ de las inclinaciones locales de la cara delantera 21 de la pieza 2 en función de tiempos de vuelo de ondas ultrasónicas emitidas por la sonda 1 en el transcurso de la etapa de aprendizaje y medios de almacenamiento 7 de las citadas estimaciones.

En el transcurso de la etapa de inspección, los medios de mando 60 orientan la sonda 1 en función de las estimaciones θ memorizadas en los medios de almacenamiento 7 y utilizan un número de zonas de recepción superior al número de zonas de recepción utilizado en el transcurso de la etapa de aprendizaje.

La figura 7a representa la red matricial 11a de corte rectangular de cuatro veces dieciséis transductores de las figuras 5 y 6, en el cual los transductores elementales C_1 a C_{64} son igualmente de forma sensiblemente cuadrada.

La figura 7b representa una red matricial 11b de corte sensiblemente cuadrado con ocho veces ocho transductores, en el cual los transductores elementales son igualmente en forma sensiblemente cuadrada.

Las figuras 7c y 7d representan redes matriciales 11c y 11d que siguen sensiblemente los mismos cortes que las redes matriciales respectivamente 11a y 11b, pero en las cuales la forma de cada transductor elemental es hexagonal.

En otro modo de realización, no representado, la forma de cada transductor elemental es circular.

La utilización de transductores elementales hexagonales permite adquisiciones al tresbolillo con pasos de incremento que valen la mitad del tamaño de los transductores elementales, y los haces de ondas ultrasónicas emitidos por los citados transductores elementales son además más simétricos.

5 La elección del corte de la red matricial depende especialmente de las piezas que haya que controlar, en particular de las curvaturas locales. Por ejemplo la utilización de una red matricial de corte rectangular está adaptada a las piezas largas de pequeña curvatura según la longitud mayor de la citada red, y la utilización de una red matricial de corte sensiblemente cuadrado está adaptada a las piezas de curvaturas equivalentes en las dos direcciones de la citada red.

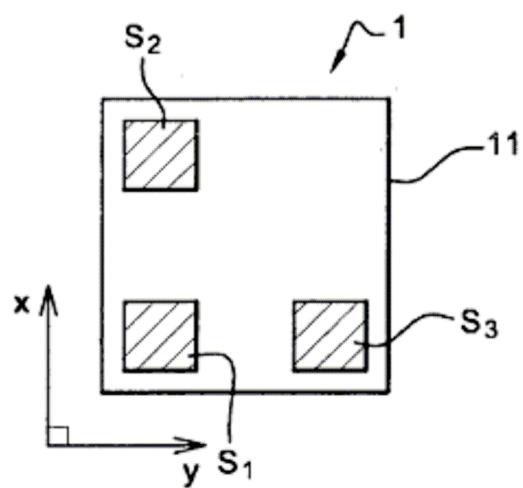
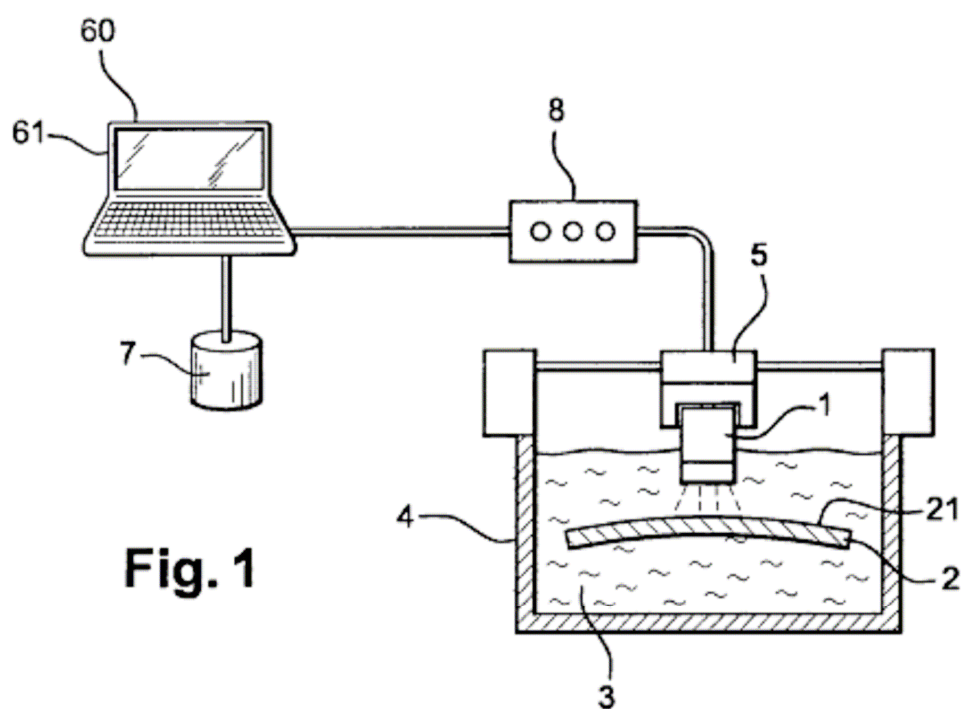
10 La presente invención permite mejorar la calidad de los resultados de la inspección ultrasónica de piezas de estructura, introduciendo una etapa de aprendizaje para cada pieza inspeccionada. Esta etapa de aprendizaje es rápida debido a una utilización de sondas de redes matriciales de transductores elementales y de una determinación numérica por cálculos poco complejos de las correcciones de orientación que hay que efectuar.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de control no destructivo por ultrasonidos de una pieza (2), que utiliza una sonda (1) ultrasónica que comprende una pluralidad de zonas de recepción (p_1 - p_3) no todas alineadas, comprendiendo el citado procedimiento una etapa de inspección en la cual se emiten ondas ultrasónicas al menos en una posición de inspección de la citada sonda en dirección a la pieza (2), una etapa de aprendizaje en la cual se miden al menos tres valores de tiempos de vuelo para al menos una posición de aprendizaje de la sonda (1) para ondas ultrasónicas emitidas por la citada sonda, reflejadas por una cara delantera (21) de la pieza (2) y recibidas por un subconjunto de las zonas de recepción que comprende al menos tres zonas de recepción (p_1 - p_3) no alineadas,
5 y porque se calcula una estimación de una inclinación local de la cara delantera (21) de la pieza (2) para al menos una posición de inspección en función de los al menos tres valores de tiempos de vuelo medidos, para corregir en la etapa de inspección la orientación de una dirección de propagación (D) de las ondas ultrasónicas emitidas para asegurar un valor de un ángulo de incidencia sobre la cara delantera (21) de la pieza (2) sensiblemente igual a un valor predefinido deseado para al menos una posición de inspección,
10 caracterizado porque el número de zonas de recepción (p_1 - p_3) utilizadas en la etapa de inspección para recibir ondas ultrasónicas reflejadas por la pieza (2) es superior al número de zonas de recepción (p_1 - p_3) del subconjunto utilizado en la etapa de aprendizaje
2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el cual las ondas ultrasónicas son emitidas en la etapa de aprendizaje y/o la etapa de inspección por al menos una zona de emisión (ϵ_1 - ϵ_3) de la sonda de superficie igual o superior a la de cada zona de recepción (p_1 - p_3).
- 20 3. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2, en el cual la sonda (1) comprende una red (11, 11a-11d) de al menos tres transductores elementales (C_1 - C_{64}) no alineados, comprendiendo cada zona de recepción (p_1 - p_3) y cada zona de emisión (ϵ_1 - ϵ_3) al menos un transductor elemental.
4. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones precedentes, en el cual se miden los al menos tres valores de tiempos de vuelo en al menos una posición de aprendizaje con zonas de recepción (p_1 - p_3) no adyacentes de la sonda (1).
25 5. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones precedentes, en el cual se obtiene la estimación de la inclinación local de la cara delantera (21) de la pieza (2) en al menos una posición de inspección estimando dos ángulos planos de inclinación local (ix,iy) definidos en dos planos no paralelos entre sí y localmente ortogonales a la citada cara delantera de la citada pieza.
- 30 6. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones precedentes, que comprende una pluralidad de posiciones de aprendizaje y en el cual se miden al menos tres valores de tiempos de vuelo para cada posición de aprendizaje.
7. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 6, que comprende una pluralidad de posiciones de inspección, y en el cual se calcula una estimación de la inclinación local para cada posición de inspección por interpolación o extrapolación de estimaciones de inclinaciones locales calculadas para diferentes posiciones de aprendizaje.
35 8. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 6, que comprende una pluralidad de posiciones de inspección, y en el cual se calcula una estimación de la inclinación local para cada posición de inspección en función de al menos tres valores de tiempos de vuelo medidos en al menos dos posiciones de aprendizaje diferentes.
9. Dispositivo de control no destructivo por ultrasonidos de una pieza (2), que comprende una sonda (1) ultrasónica que comprende una red matricial (11, 11a-11d) de transductores elementales (C_1 - C_{64}) que determinan una pluralidad de zonas de recepción (p_1 - p_3) no todas alineadas, medios mecánicos (5) aptos para orientar la dirección de propagación (D) de las ondas ultrasónicas emitidas por la sonda (1) y para desplazar la citada sonda con respecto a la pieza (2), y medios de mando (60) de los citados medios mecánicos, comprendiendo el citado dispositivo:
40 - medios de cálculo (61) de estimaciones de inclinaciones locales de una cara delantera (21) de la pieza (2) en función de valores de tiempos de vuelo medidos en el transcurso de un aprendizaje previo de la citada cara delantera de la pieza (2) para ondas ultrasónicas emitidas por la sonda (1) y recibidas por un subconjunto de zonas de recepción que comprende al menos tres zonas de recepción (p_1 - p_3) no alineadas,
45 - medios de almacenamiento (7) de las estimaciones de las inclinaciones locales,
y estando caracterizado el citado dispositivo porque, en el transcurso del control no destructivo de las características estructurales de la pieza (2), los medios de mando (60) están adaptados para orientar la sonda (1) en función de las estimaciones de las inclinaciones locales memorizadas en los medios de almacenamiento (7) y para utilizar un número de zonas de recepción (p_1 - p_3) superior al número de zonas de recepción (p_1 - p_3) del subconjunto utilizado en el transcurso del aprendizaje previo.
50

10. Dispositivo de acuerdo con la reivindicación 9, en el cual el corte de la red matricial (11, 11a-11d) de la sonda (1) es de forma sensiblemente rectangular o cuadrada.

11. Dispositivo de acuerdo con las reivindicaciones 9 o 10, en el cual cada transductor elemental (C_1 - C_{64}) es de forma rectangular o hexagonal o circular.



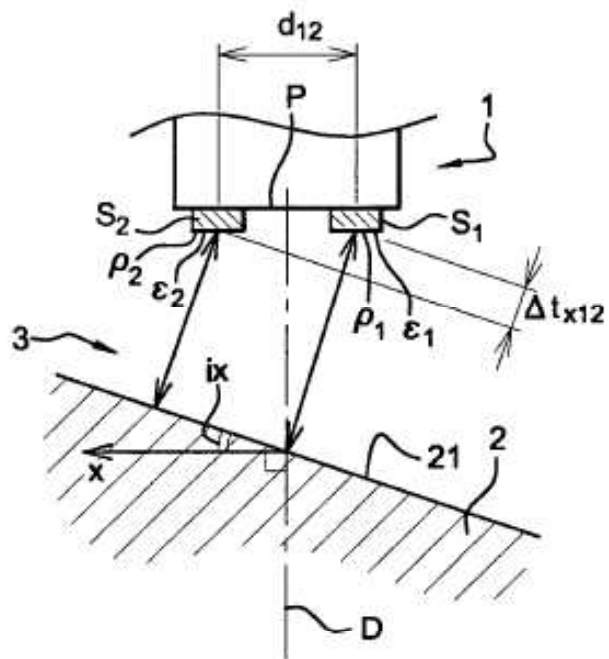


Fig. 3a

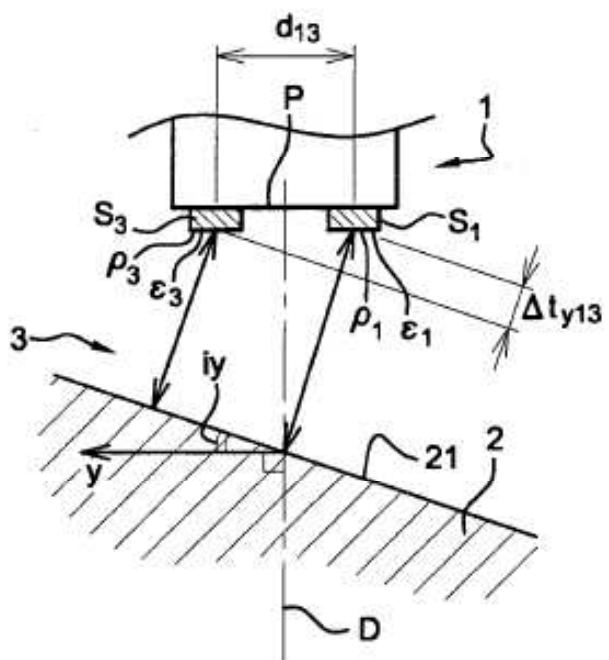


Fig. 3b

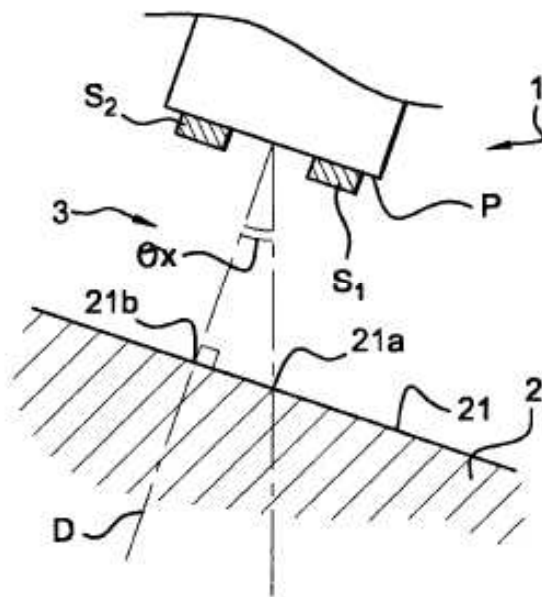


Fig. 3c

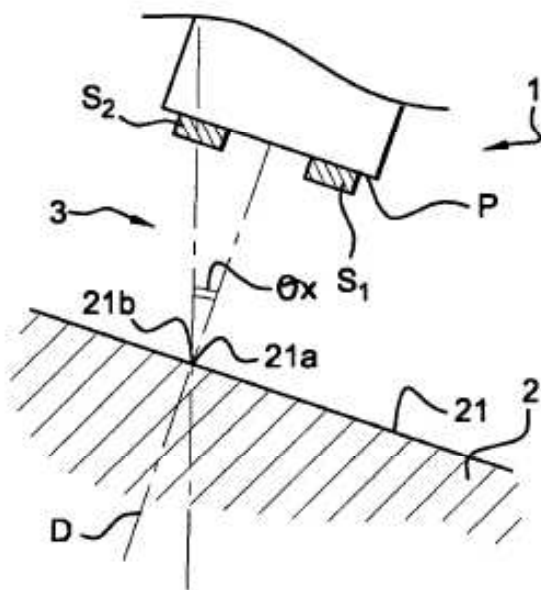


Fig. 3d

