

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 788 735**

51 Int. Cl.:

G06F 17/50 (2006.01)

G01L 1/00 (2006.01)

G01L 5/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.02.2016 PCT/JP2016/055072**

87 Fecha y número de publicación internacional: **09.09.2016 WO16140094**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.02.2016 E 16758788 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.04.2020 EP 3267341**

54 Título: **Método de estimación de tensión residual y dispositivo de estimación de tensión residual**

30 Prioridad:

05.03.2015 JP 2015043081

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

22.10.2020

73 Titular/es:

**KABUSHIKI KAISHA KOBE SEIKO SHO (KOBE STEEL, LTD.) (100.0%)
2-4 Wakinohama-Kaigandori 2-chome, Chuo-ku
Kobe-shi, Hyogo 651-8585 , JP**

72 Inventor/es:

**OKITA KEISUKE;
NAKAGAWA TOMOKAZU y
YAMADA MARIKO**

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 788 735 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 estimación de tensión residual y dispositivo de estimación de tensión residual

5 Campo técnico

La presente invención se refiere a un método de estimación de tensión residual y a un dispositivo de estimación de tensión residual para estimar la tensión residual de una estructura basándose en un método de deformación inherente.

10

Antecedentes de la técnica

La tensión residual generada en una estructura causa daños tales como grietas por fatiga en algunos casos y es importante entender con precisión la distribución de la tensión residual en la estructura. Como método de estimación de la tensión residual de una estructura, se ha conocido un método de realizar un análisis termo-elástico-plástico en un modelo local de una estructura soldada (consulte el documento de patente 1) y un método que usa un método de deformación inherente (por ejemplo, véanse los documentos de patente 2 y 3).

15

20

En un método de estimación de la tensión residual basado en el método de deformación inherente de la técnica relacionada, se cortan dos tipos de piezas cortadas a partir de una estructura, se mide la deformación elástica o la tensión residual de cada pieza cortada y el valor medido de la deformación elástica o la tensión residual de cada pieza cortada se aplica a un proceso de análisis inverso basado en un método de elementos finitos. En el proceso de análisis inverso, la deformación inherente se aproxima mediante el método de los mínimos cuadrados usando una función de distribución, la distribución de la deformación inherente se determina en la estructura y la tensión residual de la estructura antes del corte se calcula a partir de la distribución de la deformación inherente obtenida.

25

Lista de citas

Referencia de patente

30

- Documento de Patente 1: EP 2 363 819 A1
- Documento de Patente 2: JP 2005 181172 A
- Documento de Patente 3: JP 2003 121273 A

35

Sumario de la invención

Problemas que la invención debe resolver

Un método de estimación de tensión residual basado en el método de deformación inherente de la técnica relacionada también se usa para estimar la tensión residual en una estructura sometida a trabajo plástico, tal como procesamiento con rodillos o granallado, además de una estructura procesada por soldadura o tratamiento térmico. En el trabajo plástico, no se produce la transformación del material o la deformación por fluencia debido al calor, y toda deformación inherente es causada sustancialmente por la deformación plástica (deformación plástica). Adicionalmente, con respecto a la estructura procesada por soldadura y tratamiento térmico, la mayor parte de la deformación inherente puede ser deformación plástica en algunos casos. En la técnica relacionada, sin embargo, no ha habido un método de estimación de tensión residual optimizado para deformación plástica.

40

45

La presente invención se ha realizado teniendo en cuenta las circunstancias anteriores y un objetivo principal de la misma es proporcionar un método de estimación de tensión residual y un dispositivo de estimación de tensión residual que pueda resolver los problemas anteriores.

50

Medios para resolver los problemas

Para resolver los problemas descritos anteriormente, un método de estimación de tensión residual de acuerdo con un aspecto de la invención incluye las características expuestas en la reivindicación 1.

55

En este aspecto, el método de estimación de tensión residual puede incluir además una etapa de adquirir tres componentes diferentes con respecto a una cualquiera de tensión residual y deformación elástica medida a partir de una pieza cortada recogida de la estructura, como el valor medido.

60

En este aspecto, la etapa de adquirir los tres componentes como el valor medido puede incluir adquirir componentes de dirección en dos direcciones perpendiculares entre sí con respecto a una cualquiera de la tensión residual y la deformación elástica medidas en una cara de corte de la pieza cortada y un componente de cizallamiento en la cara de corte, como el valor medido.

65

En este aspecto, la etapa de adquirir los tres componentes como el valor medido puede incluir, cuando se supone

que la deformación inherente se distribuye uniformemente en una dirección, adquirir tres componentes con respecto a una cualquiera de la tensión residual y la deformación elástica medidas en una cara de corte que interseca dicha una dirección, como el valor medido.

5 En este aspecto, el método de estimación de tensión residual puede incluir además una etapa de, cuando se supone que la deformación inherente se distribuye uniformemente en una dirección, adquirir el valor medido a partir de una pieza cortada con respecto a una región en la que la deformación inherente se distribuye uniformemente.

10 Un dispositivo de estimación de tensión residual de acuerdo con otro aspecto de la presente invención incluye las características expuestas en la reivindicación 6.

Ventajas de la invención

15 De acuerdo con la presente invención, es posible estimar la tensión residual adecuada para una estructura en la que se produce una deformación inherente ocupada principalmente por una deformación plástica.

Breve descripción de los dibujos

20 La figura 1 es un diagrama de bloques que ilustra una configuración de una realización de un dispositivo de estimación de tensión residual de acuerdo con la presente invención.

La figura 2 es una vista lateral que ilustra una configuración de un cigüeñal.

La figura 3 es una vista lateral ampliada que ilustra el trabajo plástico para el cigüeñal.

25 La figura 4 es un diagrama de flujo que ilustra el procedimiento de un método de estimación de tensión residual de acuerdo con la realización de la presente invención.

La figura 5 es una vista en perspectiva que ilustra un ejemplo de una pieza cortada recogida de una estructura.

La figura 6 es una vista en sección transversal de un eje de muñón para ilustrar la recogida de una pieza en C.

30 La figura 7 es un diagrama esquemático que ilustra un ejemplo de medición de tensión residual de la pieza cortada.

La figura 8 es una vista en perspectiva que ilustra un modelo de análisis usado para una prueba de evaluación.

30 La figura 9A es un diagrama que ilustra un modelo de análisis de una pieza en T.

La figura 9B es un diagrama que ilustra un modelo de análisis de la pieza en C.

La figura 10A es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en una dirección circunferencial del acuerdo en la prueba 1.

35 La figura 10B es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en una dirección circunferencial del pasador en la prueba 1.

La figura 10C es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en una dirección radial del acuerdo en la prueba 1.

La figura 11A es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en la dirección circunferencial del acuerdo en la prueba 2.

40 La figura 11B es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en la dirección circunferencial del pasador en la prueba 2.

La figura 11C es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en la dirección radial del acuerdo en la prueba 2.

45 La figura 12A es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en la dirección circunferencial del acuerdo en la prueba 3.

La figura 12B es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en la dirección circunferencial del pasador en la prueba 3.

50 La figura 12C es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de la tensión residual en la dirección radial del acuerdo en la prueba 3.

Mejor modo de llevar a cabo la invención

A continuación en el presente documento, se describirán realizaciones preferidas de la presente invención con referencia a los dibujos.

55 Un dispositivo de estimación de tensión residual de acuerdo con una realización de la presente invención está destinado a estimar la tensión residual de una estructura basándose en un método de deformación inherente que usa la incompresibilidad de una estructura sometida a trabajo plástico, es decir, la propiedad de que el volumen no cambia antes y después del trabajo.

60 [Configuración del dispositivo de estimación de tensión residual]

65 Un ordenador 10 realiza un dispositivo de estimación de tensión residual 1. Como se ilustra en la figura 1, el ordenador 10 incluye un cuerpo principal 11, una unidad de entrada 12 y una unidad de visualización 13. El cuerpo principal 11 incluye una CPU 111, una ROM 112, una RAM 113, un disco duro 115, un dispositivo de lectura 114, una interfaz de entrada/salida 116 y una interfaz de salida de imágenes 117, y la CPU 111, la ROM 112, la RAM

113, el disco duro 115, el dispositivo de lectura 114, la interfaz de entrada/salida 116 y la interfaz de salida de imágenes 117 están conectadas por un bus.

5 La CPU 111 puede ejecutar un programa informático cargado en la RAM 113. La CPU 111 ejecuta un programa de estimación de tensión residual 110 que es un programa informático para la estimación de tensión residual y, por tanto, el ordenador 10 funciona como el dispositivo de estimación de tensión residual 1. El programa de estimación de tensión residual 110 es un programa de proceso de análisis inverso basado en un método de elementos finitos, y hace posible estimar un estado de distribución de deformación inherente en la estructura.

10 La ROM 112 está configurada por una ROM de máscara, una PROM, una EPROM, una EEPROM o similar y se graba con el programa informático a ejecutar por la CPU 111 y los datos usados para el mismo.

15 La RAM 113 está configurada por una SRAM, una DRAM o similar. La RAM 113 se usa para leer el programa de estimación de tensión residual 110 grabado en el disco duro 115. Cuando la CPU 111 ejecuta el programa informático, la RAM se usa como una región de trabajo de la CPU 111.

20 En el disco duro 115 se instalan diversos programas informáticos para ser ejecutados por la CPU 111, tales como el sistema operativo, el programa de aplicación y similares, y los datos usados para la ejecución de un programa informático asociado. El programa de estimación de tensión residual 110 también se instala en este disco duro 115.

En el disco duro 115 se instala un sistema operativo tal como Windows (marca registrada) fabricado y comercializado por US Microsoft Co., por ejemplo. En la siguiente descripción, se supone que el programa de estimación de tensión residual 110 de acuerdo con esta realización funciona en el sistema operativo.

25 El dispositivo de lectura 114 está configurado por una unidad de disco flexible, una unidad de CD-ROM, una unidad de DVD-ROM o similar, y puede leer el programa informático o los datos grabados en un medio de grabación portátil 120. El programa de estimación de tensión residual 110 se almacena en el medio de grabación portátil 120 para hacer que el ordenador funcione como el dispositivo de estimación de tensión residual. El ordenador 10 puede leer el programa de estimación de tensión residual 110 a partir del medio de grabación portátil 120 e instalar el programa de estimación de tensión residual 110 en el disco duro 115.

30 La interfaz de entrada/salida 116 está configurada mediante, por ejemplo, una interfaz en serie tal como un USB, un IEEE 1394 o un RS-232C, o similar, una interfaz en paralelo tal como una SCSI, un IDE, un IEEE 1284, o similar, y una interfaz analógica que incluye un convertidor D/A, un convertidor A/D y similares. La unidad de entrada 12 que incluye un teclado y un ratón está conectada a la interfaz de entrada/salida 116, y un usuario puede introducir datos en el ordenador 10 usando la unidad de entrada 12.

35 La interfaz de salida de imágenes 117 está conectada a la unidad de visualización 13 configurada por una LCD, un CRT o similar, y una señal de vídeo de acuerdo con los datos de imagen enviados desde la CPU 111 se envía a la unidad de visualización 13. La unidad de visualización 13 muestra una imagen (pantalla) de acuerdo con la señal de entrada de vídeo.

[Principio para la estimación de tensión residual basado en el método de deformación inherente]

45 (1) Cálculo de la tensión residual usando la deformación inherente

Cuando la deformación inherente es ϵ_0 , la tensión residual σ se expresa mediante la siguiente expresión.

$$\sigma = D(\epsilon - \epsilon_0) \quad (1)$$

50 D representa una matriz de coeficientes elásticos y ϵ representa todas las deformaciones que satisfacen la relación de la siguiente expresión.
[Ecuación 1]

$$\int \mathbf{B}^T \sigma dV = \int \mathbf{B}^T D(\epsilon - \epsilon_0) dV = 0 \quad (2)$$

55 En el presente documento, $\int dV$ representa una integral de volumen en la región de análisis y B representa una matriz de coeficientes para relacionar un desplazamiento de nodo u y ϵ .

$$\epsilon = \mathbf{B}u \quad (3)$$

60 En un caso donde se conoce la deformación inherente, la tensión residual se obtiene de la siguiente manera.

Las siguientes expresiones provienen de las expresiones (2) y (3).
[Ecuación 2]

$$Ku = P \quad (4)$$

5

donde,

$$K = \int B^T D B dV \quad (5)$$

10

$$P = \int B^T D \epsilon_0 dV \quad (6)$$

K representa una matriz de rigidez y P representa un vector de carga generado por la deformación inherente.

15 Cuando se obtiene "u" resolviendo la expresión (4), la tensión residual se puede obtener de las expresiones (3) y (1).

(2) Cálculo de la deformación inherente usando la tensión residual medida

20 N valores de tensión residual medidos se expresan como σ_m . De forma correspondiente, los valores calculados de N de la tensión residual obtenidos a partir de la deformación inherente se expresan como σ_c , y un residuo R entre la tensión residual calculada y la tensión residual medida se define mediante la siguiente expresión.
[Ecuación 3]

$$R = (\sigma_m - \sigma_c)^T (\sigma_m - \sigma_c) \quad (7)$$

25

La deformación inherente en cierto punto se expresa como la siguiente función lineal mediante los parámetros "a" de función de distribución M.
[Ecuación 4]

$$\epsilon_0 = Ma \quad (8)$$

30

donde M representa una función de coordenadas y las coordenadas pueden no ser lineales.

35 Cuando la deformación inherente se determina mediante la expresión (8), la tensión residual medida se obtiene mediante el método de (1) anterior y, como resultado, se obtiene una ecuación de relación lineal como sigue.
[Ecuación 5]

$$\sigma_c = Ha \quad (9)$$

40 donde H representa una matriz de coeficientes y el componente de la misma puede obtenerse obteniendo tensión residual al dar un valor unitario a cada componente de a.

45 Cuando la expresión (9) sustituye a la expresión (7) y se determina "a" de modo que R sea el mínimo, se determina una distribución de deformación inherente en la que un error entre la tensión residual medida y la tensión residual calculada en el punto de medición es el mínimo.

[Funcionamiento del dispositivo de estimación de tensión residual]

50 A continuación en el presente documento, se describirá el funcionamiento del dispositivo de estimación de tensión residual 1 de acuerdo con la realización.

El dispositivo de estimación de tensión residual 1 realiza el procesamiento de estimación de tensión residual como se describe a continuación para estimar la tensión residual de la estructura.

55 La estructura se forma por trabajo plástico. En el presente documento, se describirá un cigüeñal como un ejemplo de la estructura. Como se ilustra en la figura 2, un cigüeñal 200 está configurado de tal manera que un eje de muñón

201 y un eje de pasador 203 están conectados por un brazo de manivela 202. En el lugar de conexión del eje de muñón 201 y el brazo de manivela 202 y el lugar de conexión del eje de pasador 203 y el brazo de manivela 202, se genera fácilmente una gran tensión durante el uso. Cuando se genera tensión residual de tensión en estos lugares de conexión, pueden producirse daños tales como grietas por fatiga. Para mejorar la longevidad a la fatiga, se realiza trabajo plástico tal como procesamiento con rodillos o granallado en los lugares de conexión y se introduce tensión residual de compresión.

La figura 3 es una vista que ilustra el trabajo plástico con respecto al cigüeñal. En la figura 3, se ilustra un caso de procesamiento con rodillos. En el procesamiento de laminación, en un estado en el que se presiona un rodillo 300 contra el lugar de conexión del eje de muñón 201 (o el eje de pasador 203) y el brazo de manivela 202, se hace girar el eje de muñón 201. Por tanto, en el lugar de conexión, se forma un acuerdo 204 y se aplica tensión residual de compresión de modo que la tensión residual se distribuya en la dirección circunferencial del eje de muñón 201.

Como se describió anteriormente, la tensión residual de la estructura que se somete a trabajo plástico se estima usando el dispositivo de estimación de tensión residual 1. La figura 4 es un diagrama de flujo que ilustra el procedimiento de un método de estimación de tensión residual de acuerdo con la realización.

Un usuario recoge una pieza cortada cortando la estructura y mide la tensión residual de la pieza cortada (etapa S1). Generalmente, la estructura se corta finamente en una dirección para recoger una pieza cortada (pieza en T) y se corta finamente en una dirección perpendicular a dicha una dirección para recoger una pieza cortada (pieza en L).

En este contexto, la tensión residual es un valor obtenido multiplicando la deformación elástica por un módulo de Young, y medir la deformación elástica es equivalente a medir la tensión residual. En consecuencia, se puede medir la deformación elástica o la tensión residual a partir de la pieza cortada. En la realización, se describirá un caso de medición de la tensión residual.

Como se ilustra en la figura 5, en el caso de una estructura simétrica de eje, tal como un eje de muñón o un eje de pasador, al que se aplica uniformemente la tensión residual de compresión en la dirección circunferencial, se obtiene una pieza en T cortando la estructura en dirección radial. Si la deformación inherente se distribuye uniformemente en la dirección circunferencial, incluso en un caso de que se obtenga una pieza en T a partir de cualquier porción en la dirección circunferencial, la deformación inherente no cambia. En consecuencia, la pieza en T que se debe recoger puede ser solo una. En consecuencia, se puede reducir el número de piezas en T a recoger. Por tanto, es posible reducir la carga de trabajo del procesamiento de corte y la medición de la tensión residual de la pieza cortada.

Por otra parte, la distribución de deformación inherente en la dirección de la longitud del eje es complicada. En consecuencia, es necesario recoger la pieza en L en una pluralidad de lugares en la dirección de la longitud del eje.

En el caso de tener una superficie doblada como la porción del acuerdo del cigüeñal, en lugar de la pieza en L, se puede recoger una pieza cortada cónica (a continuación en el presente documento, denominada "pieza en C") cortada en una dirección normal a la superficie doblada. En la figura 6, cada vista es una vista en sección transversal cuando el eje de muñón se corta en la dirección longitudinal del eje de rotación. Se obtiene una pieza en C 500 cortando la estructura en una dirección normal a la superficie doblada del acuerdo, es decir, en la dirección del radio del acuerdo en forma de arco en la sección. Dado que el eje de muñón tiene una forma simétrica de eje, una cara de corte 501 de la pieza en C 500 se extiende cónicamente alrededor del eje central de rotación del eje de muñón. Se recogen varias piezas en C cambiando el ángulo central del acuerdo (en la figura 6, de 20 ° a 110 ° con una etapa de 10 °).

En un caso en el que la tensión residual de compresión se aplica uniformemente a una estructura en forma de barra larga en una dirección en la dirección longitudinal, solo se puede recoger una pieza en T en un lugar en la dirección longitudinal.

El usuario mide directamente la tensión residual de la pieza cortada recogida como se describió anteriormente con rayos X o similares. En el caso de medir la deformación elástica, el usuario une un medidor de deformación en la pieza cortada y corta además la pieza cortada en una pluralidad de piezas pequeñas para medir la deformación liberada (deformación elástica) de cada pieza pequeña. En la medición de la tensión residual o la deformación liberada (deformación elástica), se miden una pluralidad de componentes que son diferentes entre sí.

La figura 7 ilustra un ejemplo de medición de la tensión residual en una pieza en T de la porción del acuerdo del eje de muñón (o eje de pasador). Una pieza en T 400 tiene una cara de corte 401 que es perpendicular a la dirección circunferencial del eje de muñón (o eje de pasador), y el usuario mide los componentes σ_r y σ_z en una dirección r y una dirección z perpendiculares entre sí en la cara de corte 401. Generalmente, estos dos componentes se miden en la pieza en T, y dos componentes de dirección perpendiculares entre sí también se miden en la pieza en L (o pieza en C).

En el caso de medir la tensión residual para la pieza en T 400, se puede medir un componente de cizallamiento τ_{rz} así como los componentes σ_r y σ_z . Por tanto, tres componentes σ_r , σ_z y τ_{rz} se pueden medir con solo la pieza en T

400. La precisión de la estimación de la tensión residual mejora en el caso de usar tres componentes en comparación con el caso de usar dos componentes de la pieza en T 400. Además, es posible usar el componente de cizallamiento τ_{rz} en lugar de recoger la pieza en L y la pieza en C. En este caso, es posible suprimir la disminución de la precisión de la estimación de la tensión residual usando el componente de cizallamiento τ_{rz} en lugar de usar el componente de tensión residual medido a partir de la pieza en L o la pieza en C. Adicionalmente, dado que el usuario tiene una gran carga de trabajo para recoger la pieza cortada y medir la tensión residual, la carga de trabajo se puede reducir a medida que el número de piezas cortadas a recoger se hace más pequeño.

Además, la tensión residual puede estimarse midiendo solo dos componentes de la pieza en T sin medición del componente de cizallamiento. En este caso, la recogida de la pieza en L y la pieza en C también se puede omitir, y la carga de trabajo se reduce. Sin embargo, dado que la tensión residual no puede estimarse considerando otros componentes que no sean los dos componentes anteriores, la precisión de la estimación se vuelve más baja en comparación con el caso de usar el componente de cizallamiento τ_{rz} y el caso de recoger la pieza en L o la pieza en C.

Se hace referencia nuevamente a la figura 4. El usuario introduce la tensión residual de la pieza cortada en el dispositivo de estimación de tensión residual 1. La CPU 111 del dispositivo de estimación de tensión residual 1 recibe la tensión residual de la entrada de la pieza cortada desde la unidad de entrada 12 (etapa S2).

A continuación, la CPU 111 determina una función de distribución de la deformación inherente (etapa S3). Como función de distribución, se puede seleccionar cualquier serie polinomial o trigonométrica de orden múltiple. En este caso, la CPU 111 puede seleccionar automáticamente la función de distribución o el usuario puede designar una función de distribución deseada usando la unidad de entrada 12. En el dispositivo de estimación de tensión residual 1, la función de distribución se puede establecer de antemano.

La función de distribución determinada en la etapa S3 está optimizada para la estructura sometida a trabajo plástico. Esto se describirá a continuación.

La deformación debido al trabajo se produce en la estructura. En general, la deformación está representada por la siguiente expresión.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{tr} + \varepsilon_{cr} \quad (10)$$

Donde, ε_e representa deformación elástica, ε_p representa deformación plástica, ε_{th} representa deformación por calor, ε_{tr} representa deformación por transformación y ε_{cr} representa deformación por fluencia. En este contexto, la deformación inherente se refiere a la deformación permanente causada dentro de la estructura por una fuerza externa térmica o mecánica (deformación no elástica). Es decir, la suma de términos no elásticos distintos de ε_e y ε_{th} en la expresión (10) es la deformación inherente.

En la estructura sometida a soldadura o tratamiento térmico, todos los términos no elásticos distintos de ε_e y ε_{th} en la expresión (10) están incluidos en la deformación inherente. En contraste, en el caso de la estructura sometida a trabajo plástico, la deformación inherente es la deformación plástica misma, sin incluir la deformación por transformación y la deformación por fluencia. En otras palabras, cuando se produce deformación plástica en el objeto, se produce un cambio de forma pero no se produce un cambio de volumen. Por lo tanto, se establece la siguiente expresión.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = 0 \quad (11)$$

Simplemente, ε_v representa deformación de volumen, y los sufijos (11, 22, 33) corresponden a los componentes respectivos (r, θ , z) en el caso de un sistema de coordenadas cilíndricas, respectivamente, y corresponden a los componentes respectivos (x, y, z) en el caso de un sistema de coordenadas ortogonales, respectivamente.

Una función de distribución expresada mediante la expresión (8) se define en detalle. Cuando la función de distribución es un polinomio de orden múltiple, se expresa mediante la expresión (12). La función de distribución también se puede definir como una serie trigonométrica.

[Ecuación 6]

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j \\ \varepsilon_{22} &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{ij} x^i y^j \\ \varepsilon_{33} &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n c_{ij} x^i y^j\end{aligned}\tag{12}$$

5 En el presente documento se describirá un caso en el que la función de distribución es un polinomio de orden múltiple. Una condición de restricción incompresible expresada mediante la expresión (11) se introduce en la función de distribución de la expresión (12). Por tanto, la función de distribución está optimizada para la estructura sometida a trabajo plástico. La función de distribución optimizada se expresa mediante la siguiente expresión. [Ecuación 7]

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j \\ \varepsilon_{22} &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{ij} x^i y^j \\ \varepsilon_{33} &= \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n (-a_{ij} - b_{ij}) x^i y^j\end{aligned}\tag{13}$$

10 Además, incluso cuando la estructura se somete a soldadura o tratamiento térmico, la mayor parte de la deformación inherente que se produce en la estructura puede ser deformación plástica. Incluso en tal caso, se puede usar la función de distribución de la expresión (13) introducida por la condición de restricción incompresible. Es decir, el método de estimación de tensión residual de acuerdo con la presente realización puede usarse no solo para la estructura sometida a trabajo plástico sino también para la estructura en la que se produce la deformación inherente ocupada principalmente por la deformación plástica.

15 Como se indica en la expresión (13), un parámetro c_{ij} se vuelve innecesario mediante la adición de la condición de restricción incompresible.

20 A continuación, la CPU 111 optimiza los parámetros de la función de distribución (etapa S4). A continuación en el presente documento, el procesamiento de la etapa S4 se describirá en detalle.

25 La CPU 111 primero determina H en la expresión (9). El procedimiento del mismo es el siguiente.

- (a) Se establece $a = [1, 0, 0, \dots, 0]^T$ y se obtiene $\varepsilon_0 = Ma$.
- (b) La expresión (4) se resuelve y se obtiene "u".
- (c) Se obtiene ε mediante la expresión (3).
- (d) se obtiene σ mediante la expresión (1).
- 30 (e) Los valores de N correspondientes al punto de medición de la tensión residual se extraen de los componentes de σ y los valores extraídos se establecen en una primera columna de H.
- (f) Se establece $a = [0, 1, 0, \dots, 0]^T$ y también se obtiene una segunda columna de H en el mismo procedimiento de (b) a (f).

35 A continuación, la CPU 111 determina "a" de modo que R de la expresión (7) sea el mínimo. En consecuencia, se optimizan los parámetros de la función de distribución.

Adicionalmente, la CPU 111 calcula un valor estimado de la tensión residual (etapa S5).

40 En el procesamiento de la etapa S5, primero, la CPU 111 obtiene la deformación inherente de un cierto punto mediante la expresión (8). Adicionalmente, la CPU 111 obtiene "u" resolviendo la expresión (4) y la "u" obtenida se aplica a la expresión (3) para obtener ε . Posteriormente, el ε obtenido se aplica a la expresión (1) para obtener σ .

A continuación, la CPU 111 muestra el valor estimado de la tensión residual obtenida en la unidad de visualización

13 (etapa S6).

Después de la etapa S6, la CPU 111 finaliza el procesamiento.

- 5 Con la configuración descrita anteriormente, es posible reflejar con precisión la propiedad física de que el volumen no cambia en el trabajo plástico, a la función de distribución, y obtener el valor estimado de la tensión residual de la estructura sometida a trabajo plástico con alta precisión.

(Otras realizaciones)

- 10 En la realización descrita anteriormente, se ha descrito una configuración en la que la tensión residual se mide a partir de la pieza cortada de la estructura y el parámetro de la función de distribución se optimiza de modo que una diferencia entre la tensión residual medido y la tensión residual calculada mediante la función de distribución sea el mínimo, pero la invención no está limitada a esto. Se puede adoptar una configuración en la que la deformación liberada (deformación elástica) se mide a partir de la pieza cortada de la estructura y el parámetro de la función de distribución se optimiza de modo que una diferencia entre la deformación liberada medida y la deformación elástica calculada por la función de distribución sea la mínima.

(Prueba de evaluación)

- 20 El o los inventores llevaron a cabo pruebas de evaluación del rendimiento del método de estimación de tensión residual descrito en las realizaciones anteriores. En esta prueba de evaluación, un valor de respuesta correcto de la tensión residual realizó un experimento numérico mediante un método de estimación de tensión residual (a continuación en el presente documento, denominado "método propuesto"), en el que se introduce la condición de restricción incompresible, usando los resultados de análisis FEM (método de elementos finitos) existente, y comparó el valor de respuesta correcto con los resultados numéricos del experimento.

- 30 En el análisis FEM, cuando se simularon las condiciones de procesamiento con rodillos de una máquina real y se hizo girar un rodillo mientras se consideraba un contacto con el acuerdo, se analizó la tensión residual en una porción del acuerdo del cigüeñal. La figura 8 es una vista en perspectiva que ilustra un modelo de análisis. Se consideró una forma axialmente simétrica, el modelo de análisis se ajustó a 30 ° en la dirección circunferencial, y se aplicaron condiciones simétricas en la dirección circunferencial a una cara terminal circunferencial. Adicionalmente, un plano central (sección en la posición de 15 °) en la dirección circunferencial del modelo de análisis se tomó como una sección de evaluación, y los resultados del análisis en esta sección de evaluación se usaron como el valor de respuesta correcto.

- 40 En el experimento numérico, se considera usar un valor de deformación inherente en la misma condición (posición, componente) que un caso de medición real. Después de simular el procesamiento con rodillos, se recogieron las piezas en T y en C en el análisis FEM y se realizó un análisis de deformación liberada para obtener la tensión residual de la pieza cortada correspondiente a la medición real. La figura 9A es un diagrama que ilustra un modelo de análisis de una pieza en T, y la figura 9B es un diagrama que ilustra un modelo de análisis de una pieza en C. Para el valor de tensión residual de la pieza cortada, se usó un valor en el centro de gravedad de un elemento.

(1) Prueba 1

- 45 El método propuesto llevó a cabo el experimento numérico en el caso en que el valor medido σ_r en la dirección r y el valor medido σ_z en la dirección z se obtuvieron en la pieza en T y el valor medido σ_r en la dirección r y el valor medido σ_θ en la dirección z se obtuvieron en la pieza en C. Además, como experimento comparativo, cada uno de los valores medidos obtenidos en la misma condición que el método propuesto se aplicó a un método de estimación de tensión residual (a continuación en el presente documento, denominado "método comparativo") basado en el método de deformación inherente que no considera la condición de restricción incompresible, y por tanto se llevaron a cabo experimentos numéricos.

- 55 Las figuras 10A a 10C son gráficos que ilustran los resultados de la prueba 1. La figura 10A es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de tensión residual en una dirección circunferencial del acuerdo, la figura 10B es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de tensión residual en una dirección circunferencial de pasador, y la figura 10C es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de tensión residual en una dirección radial del acuerdo. En las figuras 10A a 10C, un eje vertical muestra la magnitud de la tensión residual, y un eje horizontal muestra la profundidad desde la superficie. Adicionalmente, en cada gráfico, la línea continua gris muestra el valor de respuesta correcto, la línea discontinua muestra los resultados del experimento numérico mediante el método comparativo, y la línea continua negra muestra los resultados del experimento numérico mediante el método propuesto.

- 65 Aunque no existe una gran diferencia en los resultados entre el método propuesto y el método comparativo, el método propuesto obtiene la tensión residual en la dirección radial del acuerdo más cerca del valor de respuesta correcto en la vecindad de la superficie, en comparación con el método comparativo. Al considerar la

incompresibilidad, es posible estimar la tensión residual con alta precisión.

(2) Prueba 2

5 Se investigó el caso en el que solo se usó la pieza en T y se estimó la tensión residual usando el componente de cizallamiento. El método propuesto llevó a cabo el experimento numérico en el caso en el que el valor medido σ_r en la dirección r, el valor medido σ_z en la dirección z y el valor medido τ_{rz} del componente de cizallamiento se obtuvieron en la pieza en T. Además, como experimento comparativo, cada uno de los valores medidos obtenidos en la misma condición que el método propuesto se sometió a un experimento numérico mediante el método comparativo.

10 Las figuras 11A a 11C son gráficos que ilustran los resultados de la prueba 2. La figura 11A es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de tensión residual en una dirección circunferencial del acuerdo, la figura 11B es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de tensión residual en una dirección circunferencial de pasador, y la figura 11C es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de tensión residual en una dirección radial del acuerdo. En las figuras 11A a 11C, un eje vertical muestra la magnitud de la tensión residual, y un eje horizontal muestra la profundidad desde la superficie. Adicionalmente, en cada gráfico, la línea continua gris muestra el valor de respuesta correcto, la línea discontinua muestra los resultados del experimento numérico mediante el método comparativo, y la línea continua negra muestra los resultados del experimento numérico mediante el método propuesto.

20 En el método propuesto, la tensión residual en la dirección θ también se puede estimar con precisión en la misma medida que en la prueba 1, incluso cuando el componente de medición en la dirección θ diferente de la cara de corte de la pieza en T no se usa. Por otra parte, la precisión de la estimación de la tensión residual en la dirección θ se deteriora extremadamente en el método comparativo. Al considerar la condición de restricción incompresible, se puede ver que la precisión de la estimación mejora.

(3) Prueba 3

30 Se investigó el caso en el que solo se usó la pieza en T y se estimó la tensión residual sin usar el componente de cizallamiento. El método propuesto llevó a cabo el experimento numérico en el caso en el que el valor medido σ_r en la dirección r, y el valor medido σ_z en la dirección z se obtuvieron en la pieza en T. Además, como experimento comparativo, cada uno de los valores medidos obtenidos en la misma condición que el método propuesto se sometió a un experimento numérico mediante el método comparativo.

35 Las figuras 12A a 12C son gráficos que ilustran los resultados de la prueba 2. La figura 12A es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de tensión residual en una dirección circunferencial del acuerdo, la figura 12B es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de tensión residual en una dirección circunferencial de pasador, y la figura 12C es un gráfico que ilustra los resultados de la estimación de tensión residual en una dirección radial del acuerdo. En las figuras 12A a 12C, un eje vertical muestra la magnitud de la tensión residual, y un eje horizontal muestra la profundidad desde la superficie. Adicionalmente, en cada gráfico, la línea continua gris muestra el valor de respuesta correcto, la línea discontinua muestra los resultados del experimento numérico mediante el método comparativo, y la línea continua negra muestra los resultados del experimento numérico mediante el método propuesto.

45 Tanto en el método propuesto como en el método comparativo, aunque la precisión de la estimación de la tensión residual en la dirección θ que no usa el valor medido ha disminuido, la degradación de la precisión es baja en el método propuesto en comparación con el método comparativo. Además, la precisión de la estimación de la tensión residual en la dirección r y la dirección z que usa el valor medido también es extremadamente baja en el método comparativo. Por otra parte, la precisión de la estimación de la tensión residual en la dirección r y la dirección z es buena en el método propuesto. A partir de este resultado, también se puede ver que la precisión de la estimación mejora al considerar la condición de restricción incompresible.

Aplicabilidad industrial

55 El método de estimación de tensión residual y el dispositivo de estimación de tensión residual de la presente invención son útiles como un método de estimación de tensión residual y un dispositivo de estimación de tensión residual para estimar la tensión residual de una estructura basándose en un método de deformación inherente.

Descripción de números y signos de referencia

- 60 1: dispositivo de estimación de tensión residual
 10: ordenador
 12: unidad de entrada
 13: unidad de visualización
 65 110: programa de estimación de tensión residual
 111: CPU

- 115: disco duro
- 116: interfaz de entrada/salida
- 117: interfaz de salida de imágenes
- 200: cigüeñal (estructura)
- 5 400: pieza en T (pieza cortada)
- 401: cara de corte
- 500: pieza en C (pieza cortada)
- 501: cara de corte

REIVINDICACIONES

1. Un método de estimación de tensión residual que comprende:

- 5 una etapa (S1) de medir un valor medido de tensión residual o deformación elástica de una pieza cortada (400) de una estructura sometida a trabajo plástico en una posición de medición;
 una etapa (S3) de introducir como condición de restricción que la estructura sometida a trabajo plástico no ha sufrido un cambio de volumen antes y después del trabajo plástico para aproximar una función de distribución de deformación inherente en la estructura sometida a trabajo plástico;
 10 una etapa (S4) de determinar un parámetro de la función de distribución de modo que un error entre el valor medido de tensión residual o deformación elástica de la estructura sometida a trabajo plástico y un valor calculado de tensión residual o deformación elástica en la posición de medición sea el mínimo; y
 una etapa (S5) de estimar la tensión residual de la estructura sometida a trabajo plástico basándose en la función de distribución para la cual se determina el parámetro.

15 2. El método de estimación de tensión residual de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además:
 una etapa de adquirir tres componentes diferentes (σ_r , σ_z , T_{rz}) con respecto a una cualquiera de tensión residual y deformación elástica medidas a partir de una pieza cortada (400) recogida de la estructura, como el valor medido.

20 3. El método de estimación de tensión residual de acuerdo con la reivindicación 2, donde la etapa de adquirir los tres componentes (σ_r , σ_z , T_{rz}) como el valor medido incluye adquirir componentes de dirección (σ_r , σ_z) en dos direcciones perpendiculares entre sí con respecto a una cualquiera de la tensión residual y la deformación elástica medidas en una cara de corte (401) de la pieza cortada (400) y un componente de cizallamiento (T_{rz}) en la cara de corte (401), como el valor medido.

25 4. El método de estimación de tensión residual de acuerdo con la reivindicación 2 o 3, donde la etapa de adquirir los tres componentes (σ_r , σ_z , T_{rz}) como el valor medido incluye, cuando se supone que la deformación inherente se distribuye uniformemente en una dirección, adquirir tres componentes (σ_r , σ_z , T_{rz}) con respecto a una cualquiera de la tensión residual y la deformación elástica medidas en una cara de corte (401) que interseca dicha una dirección, como el valor medido.

30 5. El método de estimación de tensión residual de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además:
 cuando se supone que la deformación inherente se distribuye uniformemente en una dirección, una etapa de adquirir el valor medido, medido a partir de una pieza cortada (400) con respecto a una región en la que la deformación inherente se distribuye uniformemente.

6. Un dispositivo de estimación de tensión residual (1) configurado para realizar el método de estimación de tensión residual de acuerdo con la reivindicación 1, comprendiendo el dispositivo de estimación de tensión residual (1):

- 40 una unidad de entrada (12) para introducir un valor medido de tensión residual o deformación elástica medido a partir de una pieza cortada (400) de una estructura sometida a trabajo plástico en una posición de medición, en el dispositivo de estimación de tensión residual (1);
 una unidad de determinación configurada para introducir como condición de restricción que la estructura sometida a trabajo plástico no ha sufrido un cambio de volumen antes y después del trabajo plástico para aproximar la función de distribución de deformación inherente en la estructura sometida a trabajo plástico, y determinar un parámetro de la función de distribución tal que un error entre el valor medido de tensión residual o deformación elástica de la estructura sometida a trabajo plástico y un valor calculado de tensión residual o deformación elástica en la posición de medición sea el mínimo;
 45 una unidad de adquisición de valor estimado configurada para adquirir un valor estimado de la tensión residual en la estructura sometida a trabajo plástico basándose en la función de distribución para la cual el parámetro es determinado por la unidad de determinación; y
 50 una unidad de visualización (13) configurada para visualizar el valor estimado adquirido por la unidad de adquisición de valor estimado.

FIG. 1

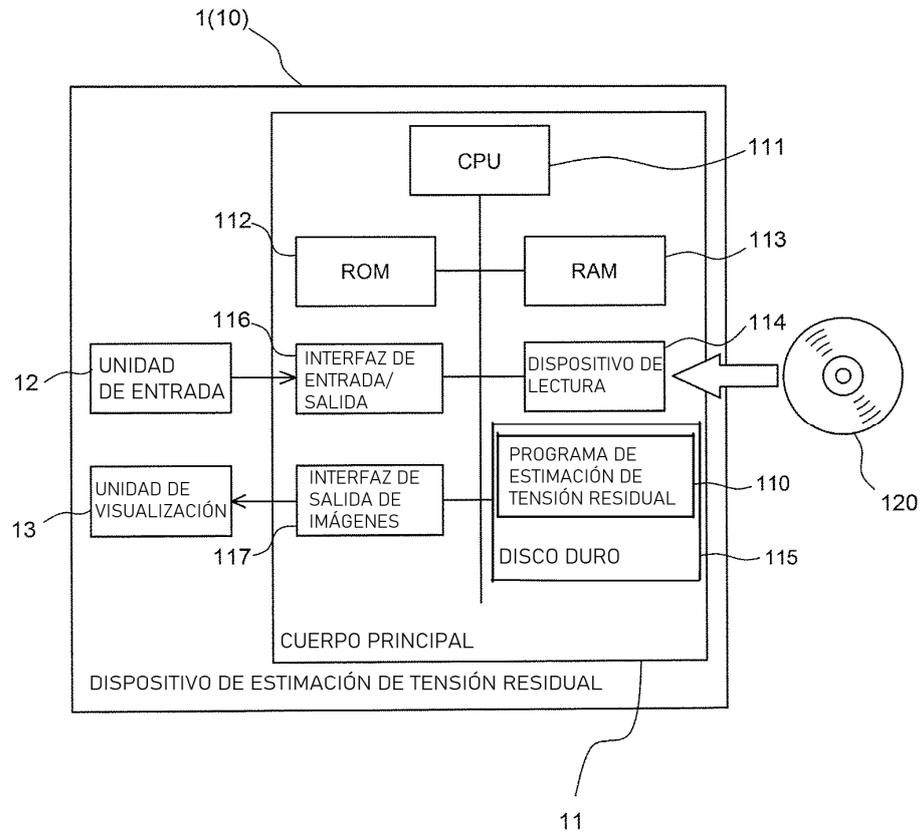


FIG. 4

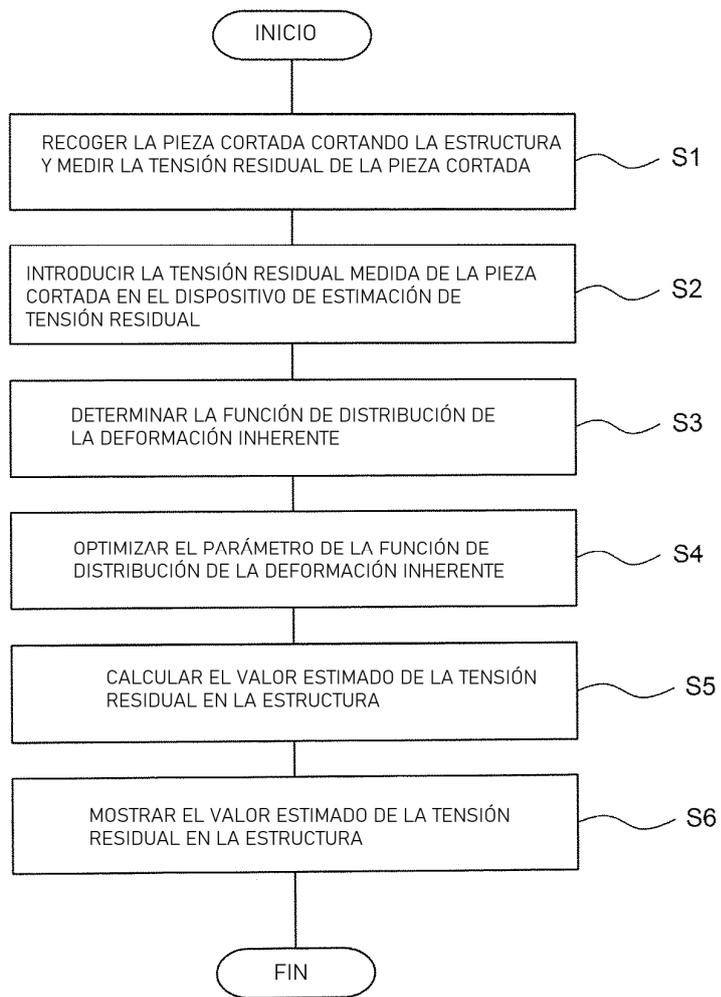


FIG. 5

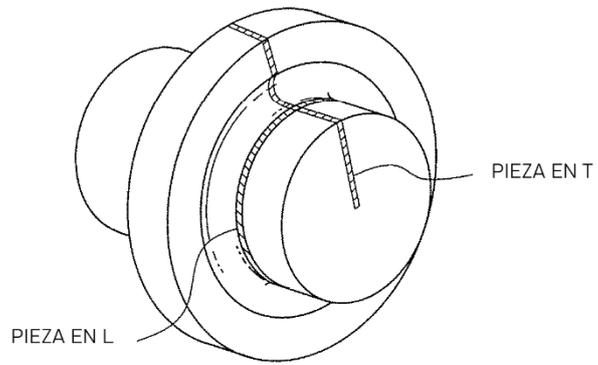


FIG. 6

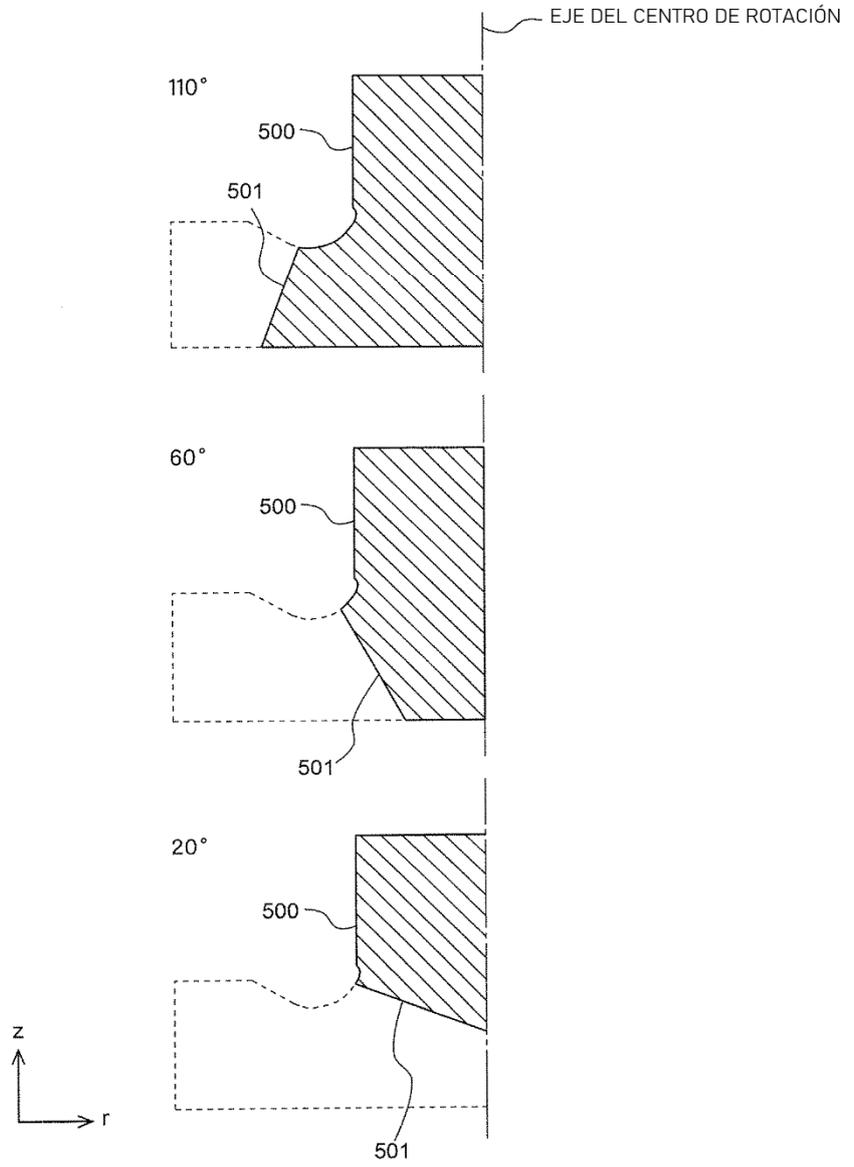


FIG. 7

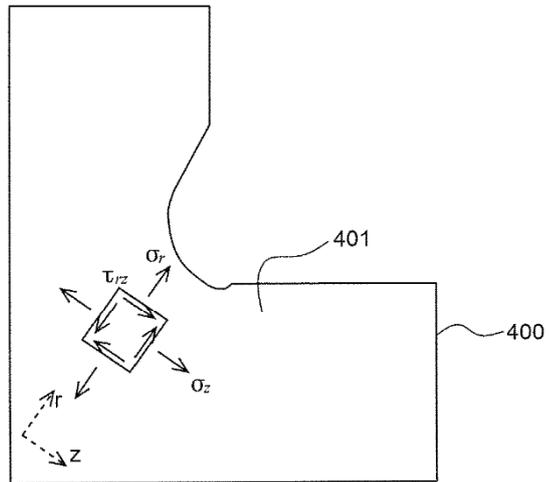


FIG. 8

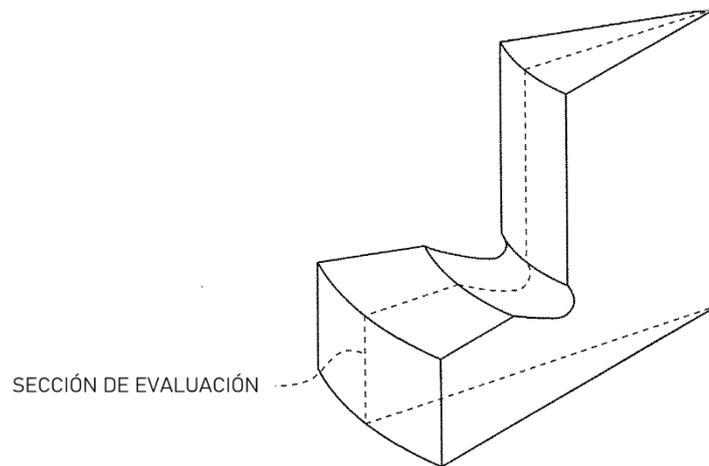


FIG. 9A

DISTRIBUCIÓN DE LA TENSIÓN EN
LA DIRECCIÓN A LO LARGO DEL ACUERDO

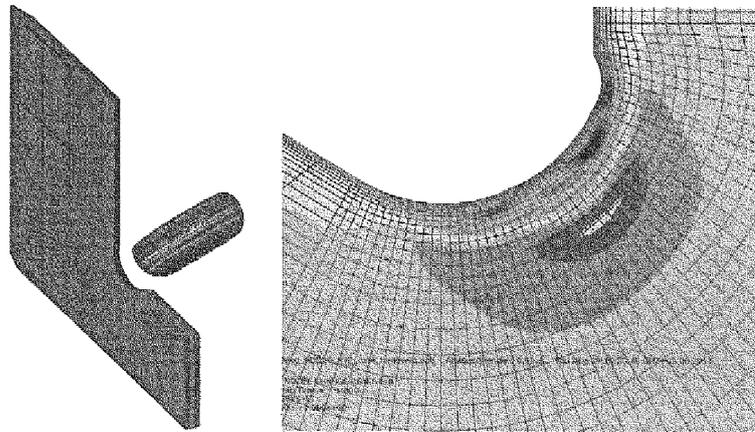


FIG. 9B

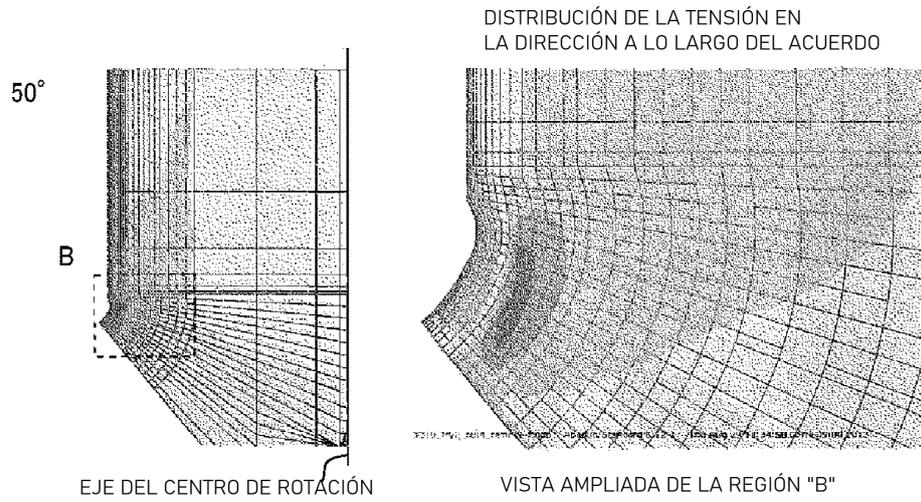
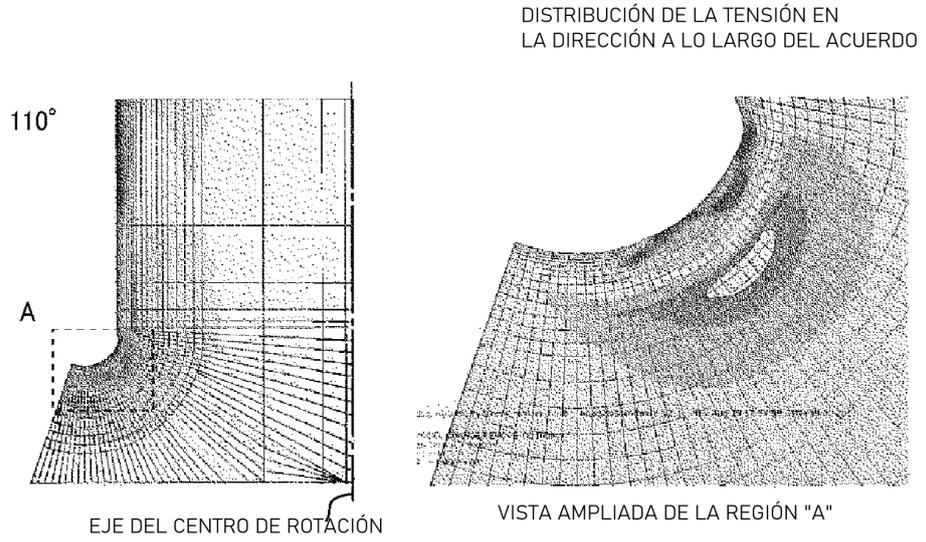


FIG. 10A

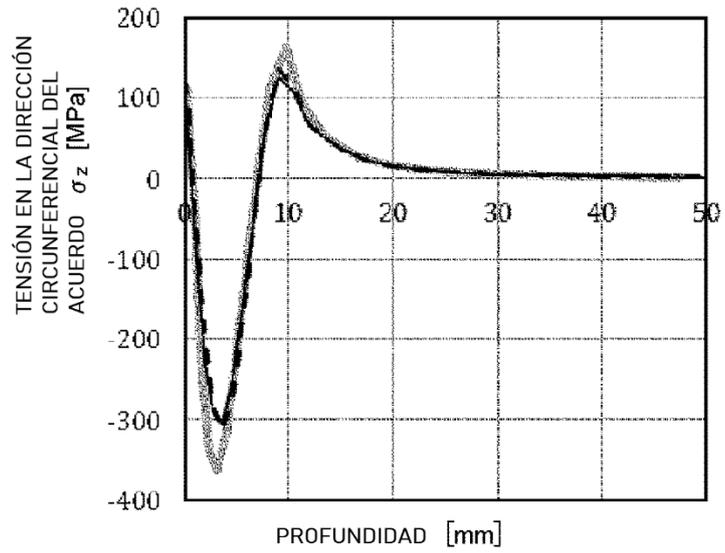


FIG. 10B

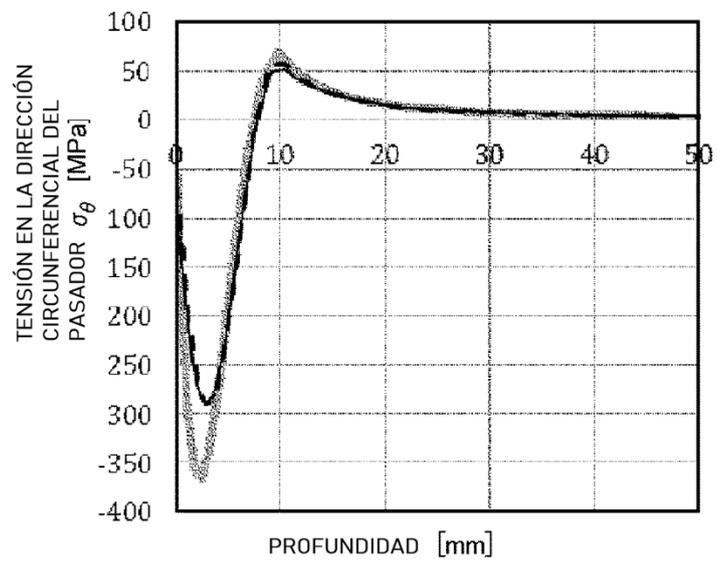


FIG. 10C

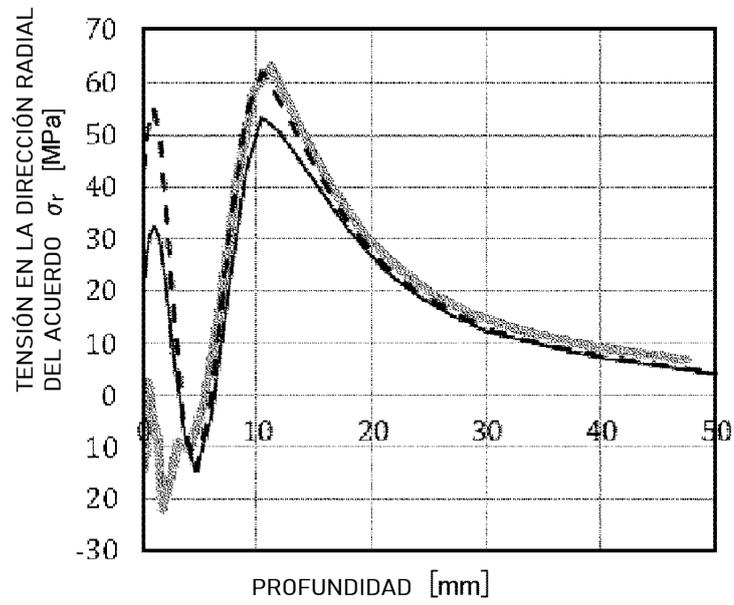


FIG. 11A

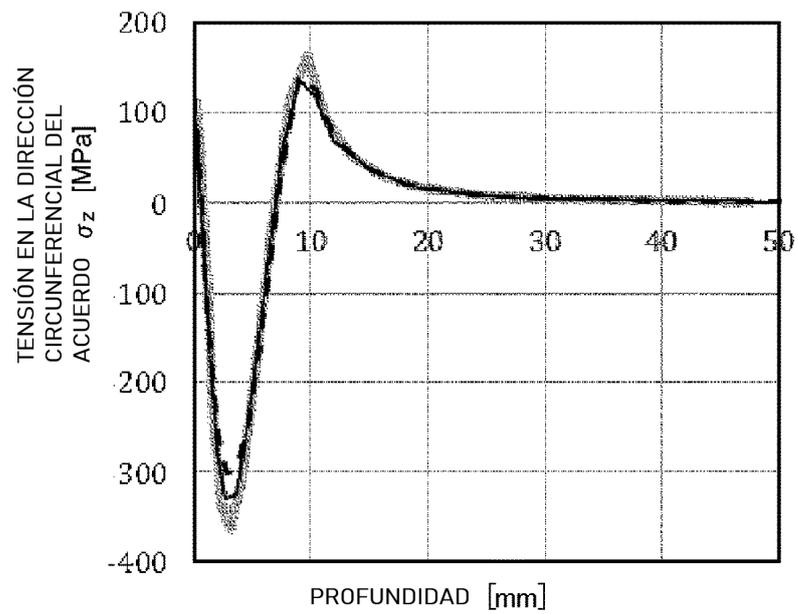


FIG. 11B

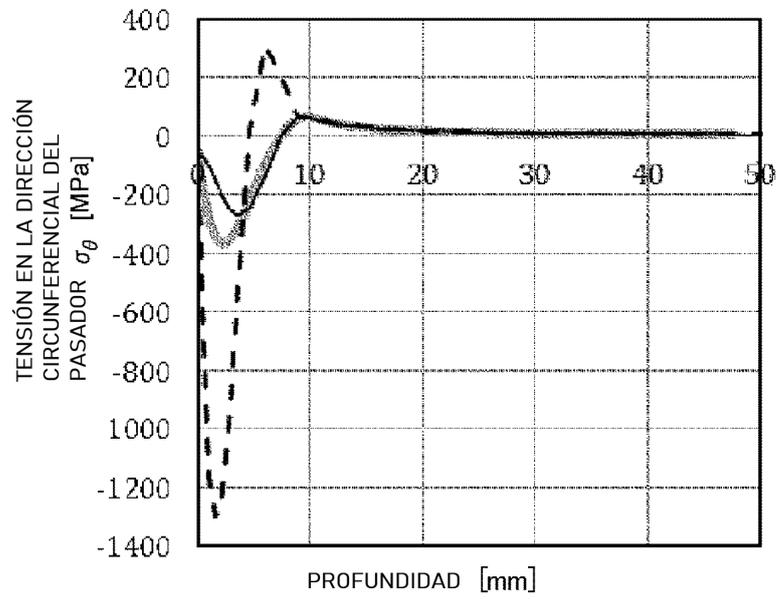


FIG. 11C

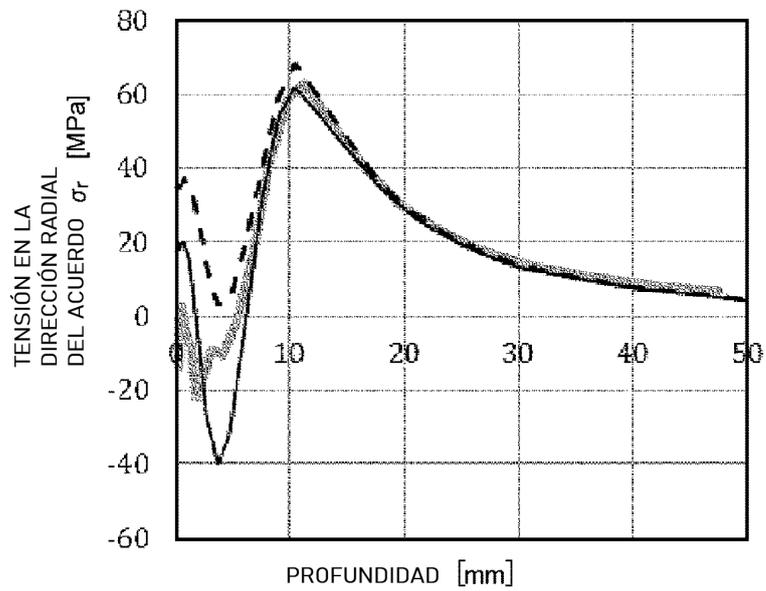


FIG. 12A

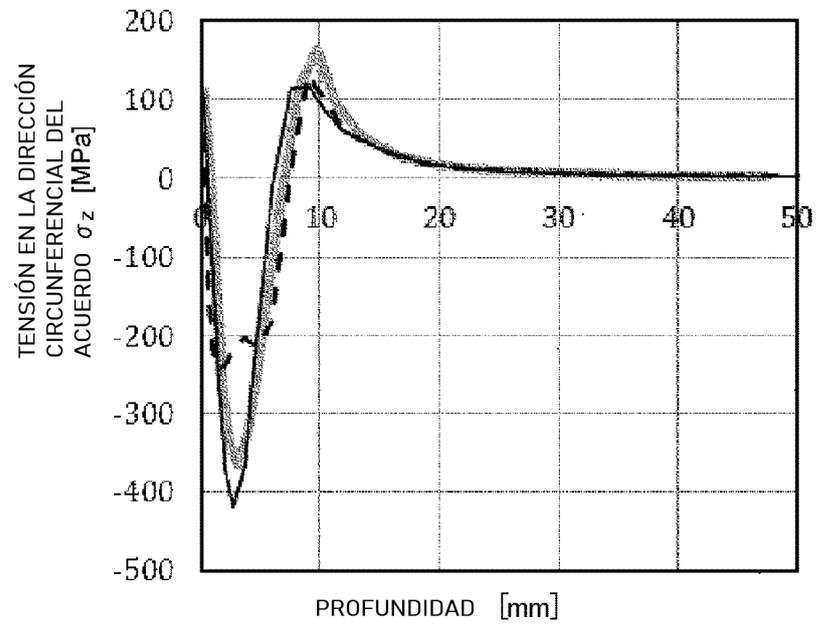


FIG. 12B

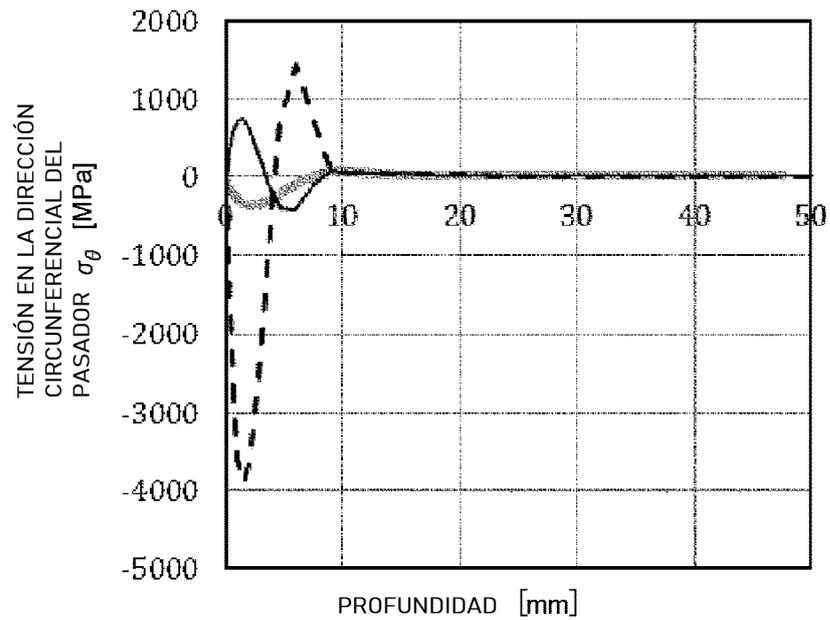


FIG. 12C

