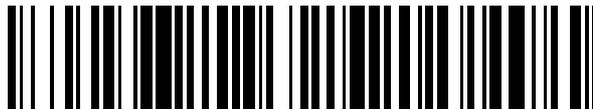


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 370 002**

51 Int. Cl.:  
**G01L 5/00**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **07024636 .8**

96 Fecha de presentación: **19.12.2007**

97 Número de publicación de la solicitud: **1936346**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **25.06.2008**

54 Título: **MÉTODO PARA DETERMINAR EL ESFUERZO RESIDUAL DE UNA PIEZA DE ENSAYO.**

30 Prioridad:  
**21.12.2006 DE 102006060714**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**09.12.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**09.12.2011**

73 Titular/es:  
**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V.  
Hansastraße 27c  
80686 München, DE**

72 Inventor/es:  
**Pfeiffer, Wulf, Dr.-Ing. y  
Wenzel, Johannes**

74 Agente: **de Elzaburu Márquez, Alberto**

ES 2 370 002 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 para determinar el esfuerzo residual de una pieza de ensayo.

**Campo técnico**

5 La invención se refiere a un método para determinar el esfuerzo residual de una pieza de ensayo según un método de taladrado de agujeros en el que sobre una superficie de la pieza de ensayo, se realiza una retirada de material para generar un rebajo de material localmente delimitado y se detecta una forma superficial que cambia debido a la retirada de material y/o al estado de tensión de la superficie de la pieza de ensayo que cambia debido a la retirada de material, cuyo estado de tensión sirve para determinar el esfuerzo residual de la pieza de ensayo que tenía la pieza de ensayo en el estado anterior a la retirada de material.

10 El término "esfuerzo residual" se ha de entender como esfuerzos mecánicos que están presentes en una pieza de trabajo o pieza de de ensayo sin una acción externa de fuerzas o momentos. Así, los esfuerzos residuales pueden introducirse en una pieza de trabajo en el curso del proceso de fabricación, por ejemplo durante procesos térmicos o mecánicos, de manera intencionada o inintencionada, por ejemplo durante tratamientos térmicos o en relación con pasados de producción tales como unión, soldadura, amolado, fresado o revestimiento. Asimismo, es posible que se generen esfuerzos residuales en una pieza de trabajo sólo o adicionalmente por demandas operacionales y así se contribuya a determinar el comportamiento operativo de los componentes. En la mayoría de los casos, los esfuerzos residuales influyen en el comportamiento de componentes de una manera negativa, por ejemplo por distorsión o fallo prematuro. Por otro lado, se usan cada vez más esfuerzos residuales de una manera beneficiosa, tal como, por ejemplo, introduciendo esfuerzos compresivos residuales dentro de una superficie mediante granallado, por ejemplo, para aumentar el comportamiento de fatiga de los componentes. Para una evaluación fiable del comportamiento operacional, la seguridad operacional y la vida útil de los componentes, así como para optimizar el disco y los métodos de fabricación, es inevitable, por tanto, la determinación de los esfuerzos residuales. En mecánica de materiales, se realiza una distinción entre tres clases de esfuerzos residuales:

25 1. Los esfuerzos residuales de la primera clase son virtualmente constantes con respecto a la cantidad y dirección en áreas de piezas de trabajo mayores, es decir, en una pluralidad de granos. Las desviaciones del equilibrio de fuerzas y momentos dan como resultado cambios y deformaciones dimensionales macroscópicas.

30 2. Los esfuerzos residuales de la segunda clase son virtualmente homogéneos en áreas de material más pequeñas, es decir, en un grano o en sub-áreas de un grano. Sólo son posibles deformaciones y cambios dimensionales macroscópicos en el caso de una alteración distinta del equilibrio.

3. Los esfuerzos residuales de la tercera clase son homogéneos en áreas de material extremadamente pequeñas, es decir, en algunas distancias interatómicas. No tienen lugar cambios macroscópicos.

35 Los esfuerzos residuales de la primera clase también se denominan esfuerzos residuales macroscópicos, mientras que los esfuerzos residuales de la segunda clase y de la tercera clase se designan como esfuerzos residuales microscópicos. El método para determinar esfuerzos residuales que se describe aquí con detalle se usa típicamente en objetos o piezas de ensayo del campo de ingeniería de planta y mecánica para la determinación de esfuerzos residuales macroscópicos; sin embargo, usando otros medios auxiliares para incorporar el taladro y determinar las tensiones, el método también puede usarse para determinar esfuerzos residuales microscópicos en componentes microelectrónicos o micromecánicos de la tecnología de microsistemas.

40 Pueden determinarse esfuerzos residuales con métodos diferentes. Se puede distinguir entre métodos no destructivos y destructivos. Con los métodos no destructivos, por ejemplo, las separaciones de los planos de una red cristalina sometida a esfuerzos residuales se miden mediante difracción de rayos X o difracción de neutrones y se comparan con las separaciones de los planos de una red de un cristal sin esfuerzos residuales. A partir de esto, se puede evaluar el estado de los esfuerzos residuales y posiblemente también el curso de la profundidad de los esfuerzos residuales. Además, existen métodos destructivos, por ejemplo mediante la división, corte o taladrado de una pieza de ensayo. Mediante tales intervenciones en una pieza de ensayo, se provoca virtualmente un cambio del estado de esfuerzo residual. En el área circundante del rebajo o filo del material generado, debido al cambio en el estado de esfuerzo residual, tienen lugar deformaciones y/o cambios de tensión, cuyos efectos pueden observarse, por ejemplo, sobre la superficie de la pieza de ensayo como un cambio en la forma superficial y/o como un cambio del estado de tensión en la superficie. Las deformaciones que tienen lugar debido a dicha provocación, que también se denominan tensiones relajadas, permiten sacar una conclusión sobre el estado de esfuerzo residual presente antes de la provocación. Dos de los métodos más comunes para determinar el esfuerzo residual son el denominado método de taladrado de agujeros según ASTM E 837-99 (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales) y el denominado método de taladrado de agujeros incremental, en donde con dichos métodos se taladra un agujero en la pieza de ensayo. Usualmente, por medio de una roseta extensométrica estandarizada aplicada sobre la superficie de la pieza de ensayo, los cambios de esfuerzo sobre la superficie se detectan simultáneamente en tres direcciones espaciales definidas y lateralmente con respecto a la superficie de la pieza de ensayo. Los métodos de taladrado de

agujeros a menudo se clasifican también como métodos semidestructivos porque la pieza de ensayo aún resulta utilizable tras la inspección. Las ventajas de los métodos de taladrado de agujeros son, entre otras, la movilidad y flexibilidad del dispositivo de ensayo. Pueden realizarse ensayos de laboratorio así como el ensayo de campo. Además, el método puede usarse en gran medida con independencia del tamaño y forma de la pieza de ensayo.

- 5 En el caso del método de taladrado de agujeros según ASTM E 837-00, se taladra en un paso un agujero ciego de profundidad definida y perpendicular a la superficie de la pieza de ensayo. A partir de los cambios de esfuerzo y/o cambios de la forma superficial determinadas sobre la superficie, se determina con respecto a la profundidad del agujero ciego el esfuerzo residual medio que consiste en los componentes de esfuerzo residual medios presentes antes de la provocación.
- 10 En contraposición a lo anterior, en el caso del método de taladrado de agujeros incremental, se determina el perfil de profundidad del esfuerzo residual, por ejemplo en forma de perfiles de profundidad de los componentes de esfuerzo residual. Para este fin, se taladra un taladro en pasos incrementales hasta una profundidad final y perpendicular a la superficie de la pieza de ensayo, en donde después de cada paso de taladrado se determina la relajación, es decir, los cambios de tensión sobre la superficie o los cambios de la forma superficial. Finalmente, la secuencia total de todos los pasos de taladrado realizados da como resultado un perfil discreto que consta de valores individuales de cambios de tensión de la superficie o de cambios de la forma de superficie en función de la profundidad de taladro, el denominado perfil de profundidad. A partir de los valores individuales discretos y mediante rutinas FIT adecuadas pueden proporcionarse las relaciones funcionales, por ejemplo entre cambios de tensión iniciados en la superficie y la profundidad del taladro. Con el fin de determinar el estado de esfuerzos residuales presentes antes de la provocación en el punto de medición o en la zona de medición de la pieza de ensayo, están disponibles una pluralidad de métodos o algoritmos de evaluación diferentes, por ejemplo la Norma ASTM E 837, Método Integral según Schajer [Schajer, G.S., Medición de Esfuerzos Residuales no Uniformes Usando el Método de Taladrado de Agujeros, Ingeniería de Materiales y Tecnología, 110 (4), Parte I: páginas 338-343, Parte II: páginas 344-349, 1988], Método de Series de Potencias [SCHAJER, G.S., Aplicaciones de Cálculos del Método de Elementos Finitos a Mediciones de Esfuerzo Residual, Revista Ingeniería de Materiales y Tecnología, Trans ASME 103, abril 1981, páginas 157-163] o el método según Kockelmann (MPA Stuttgart) desarrollado adicionalmente por Schwarz [T. Schwarz, "Contribución a la determinación de tensiones propias en material estratificados isótropos e inhomogéneos por medio del método de taladrado de agujeros y el procedimiento de métodos anulares"; Informe técnico-científico; (1996); MPA Stuttgart].
- 20
- 25
- 30 Estos métodos de evaluación se refieren parcialmente a una medición de calibración o a los resultados de un modelo FEM (Modelo de Elementos Finitos) que describe la función de transferencia con la que el cambio de un estado de esfuerzo residual conocido a una cierta profundidad de taladrado con una geometría definida del rebajo conduce a cambios de tensión sobre la superficie, o conduce a un cambio de la forma de superficie. Además de la evaluación de ensayo por medio de modelos computacionales mecánicos, existe también la posibilidad de calibración experimental del dispositivo de medición por medios de casos conocidos de esfuerzo. Sin embargo, el resultado de todos los métodos de evaluación son dos esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  con respecto a la profundidad así como su dirección con respecto a la direcciones de medición de la roseta extensométrica aplicada que consta de tres calibres de tensión. Para el cálculo de estas tres variables, están disponibles tres funciones que describen el cambio de tensión de una manera relacionada con la dirección en función de la profundidad de retirada. Por tanto, esto da como resultado un sistema de ecuaciones solucionable con tres ecuaciones y tres variables desconocidas por cada profundidad de retirada. De este modo, el contenido de información de una medición semejante se agota después de la determinación del estado de esfuerzo residual con la forma de  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  y sus direcciones con respecto a la alineación de la roseta extensométrica. No se dispone de información de medición adicional por medio de la cual podría realizarse una manifestación acerca de la calidad de la medición. En consecuencia, no puede proporcionarse una información de errores que permitiría especificar cuantitativamente la incertidumbre de medición de la distribución de profundidad del esfuerzo residual determinada de esta manera. Específicamente en el caso del método de taladrado de agujeros incremental, la información relativa a la incertidumbre de la medición es particularmente importante porque este método de medición implica una serie de imponderables que resultan fácilmente evidentes a partir del resultado de medición obtenido. Esto incluye, por ejemplo, un taladro que corre excéntricamente con respecto a la roseta extensométrica, tensiones plásticas adicionales provocada por el efecto muesca del taladro, gradientes altos de esfuerzo residual, etc.
- 35
- 40
- 45
- 50

#### Técnica Anterior

- Hasta la fecha, se conocen únicamente unas pocas posibilidades insatisfactorias para sustanciar cuantitativamente resultados de mediciones de taladros. Una posibilidad es realizar una pluralidad de mediciones en muestras similares o piezas de ensayo. Sin embargo, dado que el estado de esfuerzo residual que se ha de medir no se conoce usualmente y dado que no puede garantizarse que el mismo estado de esfuerzo residual sea idéntico para todas las muestras ensayadas o piezas de ensayo, este enfoque está aquejado de incertidumbres.
- 55

Los enfoques adicionales para determinar incertidumbres de medición se basan en dos métodos. El primer método usa rosetas extensométricas que tienen más de tres sensores de tensión individuales. De este modo, es posible la

determinación de un conjunto de datos de medición sobredeterminados, la cual puede usarse para calcular una desviación estándar. La desventaja de este método es que, por razones geométricas, el número de sensores de tensión adicionales no puede ser muy grande debido al espacio limitado en las proximidades del taladro. Los prototipos de tales rosetas extensométricas tienen típicamente una rejilla de medición de 3 x 3. Además, en tal disposición, los errores de posicionamiento menores de la herramienta de taladrado dan como resultado una corrupción de la información de errores. Además, tales rosetas extensométricas son relativamente caras. Se ha de mencionar, como una fuente representativa de este método, el artículo "Medición de esfuerzos residuales por el método de calibración de tensión por taladrado de agujeros", Tech Note TN-503-6, 2 de mayo de 2005, XP002586466.

5

10 Asimismo, en el método para determinar esfuerzos residuales en componentes descrito en el documento DE 39 40 312 A1, se usan rosetas extensométricas para determinar tensiones o tensiones residuales. Aquí, la medición de la recuperación elástica de la superficie tiene lugar en el núcleo del punto de medición rodeado por una ranura anular, en donde el núcleo del punto de medición se incorpora sobre un componente por la retirada de material.

15 En el artículo de A.T. De Wald y M.R. Hill, "Reducción de datos mejorada para el método de agujero profundo de medición de esfuerzo residual", Revista Análisis de Tensiones, vol. 38, 1 de enero de 2003, páginas 65-78, XP002586467, se describe cómo puede obtenerse información de esfuerzo residual por medio de un agujero de núcleo y por la medición del taladro resultante en el componente.

20 Un segundo método está basado en la determinación óptica de campos de tensión en las proximidades del taladro por medio del Método Speckle o del método de correlación de escala de grises. Estos métodos ofrecen principalmente la condición previa para determinar una incertidumbre de medición estadísticamente bien sustanciada; sin embargo, la desventaja es que el punto de medición o la zona de medición ha de ser accesible a través de un ángulo de visión amplio y, además, se han de cumplir ciertos criterios ópticos.

#### Descripción de la invención

25 La invención se basa, por tanto, en el objeto para proporcionar un método por medio del cual se permita la determinación de un esfuerzo residual de una pieza de ensayo con indicación de un error que aqueje al método de determinación, y todo ello con una fiabilidad científicamente fundada y gastos reducidos relacionados con el proceso.

30 La solución del objeto subyacente a la invención se especifica en la reivindicación 1. Características ventajosas que desarrollan la idea inventiva son materia objeto de las reivindicaciones subordinadas y surgen de la descripción con referencia a las realizaciones ejemplares. Según la solución, un método para determinar el esfuerzo residual de una pieza de ensayo según el método de taladrado de agujeros incremental en el que sobre una superficie de la pieza de ensayo se realiza una retirada de material para generar un rebajo de material localmente delimitado y se detectan un cambio de forma de superficie debido a la retirada de material y/o un estado de tensión de la superficie de la pieza de ensayo que cambia debido a la retirada de material, sobre la base de cuyos cambios se calcula un valor de esfuerzo residual que sirve para determinar el esfuerzo residual de las piezas de ensayo que la pieza de ensayo tenía antes de la retirada de material, se desarrolla porque al menos se realizan dos retiradas de material, cada una con la misma profundidad de retirada de material, en donde los rebajos de material resultantes de las al menos dos retiradas de material se solapan al menos parcialmente de manera lateral respecto de la superficie. Después de cada retirada de material, se detecta la forma de superficie que ha cambiado en cada caso y/o se detecta el estado de tensión de la superficie de la pieza de ensayo que ha cambiado en cada caso y se determina un valor de esfuerzo residual en cada caso. Sobre la base de los al menos dos valores de esfuerzo residual determinado, el esfuerzo residual y un error que aqueja al esfuerzo residual se determinan subsiguientemente con respecto a la profundidad de la retirada de material.

45 Preferiblemente, la retirada de material paso a paso para una profundidad de retirada de material especificada tiene lugar concéntricamente hasta un rebajo de material inicial. Si se usan herramientas de taladrado para la retirada de material, resulta ventajoso usar herramientas de taladrado con un diámetro de broca que aumente gradualmente para obtener una expansión lateral deseada del taladro a una profundidad de taladrado constante. Igualmente, también es posible crear la expansión lateral del taladro desplazando lateralmente una herramienta de taladrado o fresado.

50 Además de una expansión lateral gradual estrictamente concéntrica de un taladro o un agujero fresado, también resultan concebibles, por supuesto, otras geometrías de retirada alrededor de un rebajo de material inicial que puede extenderse en una dirección espacial lateral preferida, por ejemplo para examinar estados de tensión anisotrópicos espaciales, incorporando, por ejemplo, agujeros oblongos que se expanden en la dirección longitudinal o formas de rebajos elípticas.

55 Por supuesto, las retiradas de material también pueden realizarse por otros métodos distintos de los métodos de taladrado o fresado mencionados preferiblemente. Sin realizar aquí una limitación, también se han de mencionar

métodos de chispa erosiva o métodos de chorro de arena.

A continuación, se describen dos métodos de retirada preferidos, cada uno con dos estrategias de taladrado diferentes por medios de las cuales puede implementarse de manera práctica el método descrito en profundidades discretas y en expansiones radiales o laterales. Dentro del contexto definido en la reivindicación 1, son concebibles cualesquiera secuencias de las retiradas de material individuales.

5 En una primera estrategia de taladrado preferida (Figura 1, lado izquierdo), en primer lugar, un elemento de volumen cilíndrico con un pequeño diámetro se elimina o se retirada con únicamente un incremento de profundidad. A continuación, se realiza una expansión incremental en la dirección radial hasta un radio más grande mientras se mantiene la profundidad, en donde dicho radio, por ejemplo, está limitado por la dimensión de la roseta extensométrica aplicada sobre la superficie de la pieza de ensayo. Después de volver al radio más pequeño, es decir, el radio del primer elemento de volumen cilíndrico retirado, se aborda la siguiente profundidad y de nuevo se la expande incrementalmente en la dirección radial. Este proceso se repite hasta que se logra el contorno final del taladro. Como en la primera estrategia preferida, después de cada retirada incremental de material, se registran los cambios de tensión y/o los cambios de forma de superficie.

15 Cuando se usa la segunda estrategia de taladrado preferida (figura 1, lado derecho), se taladra un taladro, preferiblemente un agujero ciego, con un diámetro pequeño, en el que la alimentación, como en el método de taladrado de agujeros incremental convencional, tiene lugar en pasos de profundidad discretos. Aquí, después de cada paso, los cambios de tensión que tienen lugar sobre la superficie de la pieza de ensayo se detectan sensorialmente sobre la superficie.

20 Subsiguientemente, la herramienta de taladrado se devuelve al nivel de la superficie y se aumenta el diámetro de taladrado en un incremento radial. De nuevo, como en el primer taladro, se retira el material en pasos de profundidad discretos hacia el fondo del taladro y de nuevo, después de cada paso individual, los cambios de tensión adicionales que tienen lugar sobre la superficie de la pieza de ensayo se detectan sensorialmente. Este proceso se repite varias veces de modo que, con cada incremento radial mayor, se retire un cilindro hueco adicional con un grosor de pared definido.

25 Sin embargo, el método según la invención no se limita a dichas estrategias de taladrado; de hecho, la secuencia de los pasos de taladrado individuales y la secuencia asociada con la que se generan los valores medidos son arbitrarias dentro del contexto definido en la reivindicación 1. Además, por ejemplo, un número diferente y tamaños diferentes de incrementos radiales en profundidades diferentes también son concebibles, dependiendo de los requisitos. Asimismo, el tamaño de los incrementos de profundidad puede ser diferente.

30 Asimismo, el método según la solución no se limita a rebajos circulares cuando éstos se obtienen mediante una retirada de material con herramientas de taladrado usuales que se hincan verticalmente con respecto a la superficie de la pieza de ensayo dentro de la misma. Igualmente, podrían seleccionarse otras geometrías de taladro o también combinaciones de geometrías diferentes.

35 A partir de cada uno de los conjuntos de datos obtenidos para una profundidad de retirada de material, cuyo número de conjuntos de datos se corresponde con el número de rebajos/expansiones, se determina en cada caso el estado de esfuerzo residual que estaba presente antes de la primera retirada de material en la profundidad respectiva. A partir de los valores obtenidos mediante esta actividad para el esfuerzo residual en esta profundidad, puede especificarse un error por medio de métodos estadísticos, por ejemplo en forma de una desviación estándar. No es necesario que se determine el mismo número de valores en cada profundidad. El orden según el cual se determinan los conjuntos de datos para profundidades y expansiones laterales diferentes es en principio arbitrario. Preferiblemente, sin embargo, la estrategia de taladrado puede definirse dentro de una calibración previa que, por ejemplo, se haya determinado mediante ensayos preliminares o por medio de un modelo de elementos finitos. Aquí, se asigna a cada evaluación individual el proceso de taladrado respectivo durante el ensayo o modelo de calibración con el fin de obtener resultados correctos.

40 A partir de los conjuntos de datos que pueden asignarse a las profundidades de retirada de material diferentes, puede determinarse finalmente un perfil de profundidad de esfuerzo residual, en el que se especifican los errores determinados respectivos para los valores determinados individuales del esfuerzo residual en la profundidad respectiva. Cuantos más pasos para cada expansión lateral individual se hayan realizado, tanto mayor será el número de conjuntos de datos disponibles y tanto más precisa podrá especificarse la incertidumbre de la medición. Cuantos más pasos se usen para alcanzar una profundidad de taladro final, tanto más precisamente podrá caracterizarse el perfil de profundidad. Los incrementos para las retiradas de material dependen, entre otras cosas, de la resolución de los calibres de tensión, el estado de esfuerzo residual inicialmente presente y las propiedades elásticas de la pieza de ensayo. Con este método, puede determinarse el esfuerzo residual en muchos materiales diferentes, por ejemplo en vidrio, cerámica, metales, plásticos, compuestos de fibra, en donde en estos últimos también es posible determinar un valor promediado para el esfuerzo residual mediante la selección del tamaño del agujero.

5 Los errores o incertidumbres de medición que aquejan al esfuerzo residual determinado, cuya especificación de incertidumbres de medición se hace posible por la expansión lateralmente incremental en el caso del método de taladrado de agujeros, reflejan una pluralidad de variables de error que son importantes para el método de taladrado de agujeros. Estas incluyen, entre otras cosas, un taladro que es impreciso con respecto al centro del taladro o la profundidad del taladro, la aparición de deformaciones plásticas del material debido al efecto muesca del taladro, y unos esfuerzos residuales adicionales generados, por ejemplo, por una broca embotada. La magnitud de la incertidumbre de medición determinada de esta manera proporciona información acerca de la calidad de la medición y simplifica la evaluación de los resultados de la medición. La ventaja general de la invención es que, al usar unos medios de medición económicos establecidos, se hace posible la especificación de incertidumbres de medición durante la determinación del esfuerzo residual. Además, al especificar incertidumbres de medición estadísticamente sustanciadas, se proporciona la posibilidad de certificar el método de medición y de usar los resultados de tales mediciones, por ejemplo, para análisis de seguridad o cálculos de vida útil.

15 El método con el que pueden obtenerse conjuntos de datos adicionales para determinar el error de un esfuerzo residual determinado, no está en principio limitado a la determinación de estados de tensión residual macroscópicos. Igualmente, pueden determinarse tensiones residuales o esfuerzos residuales microscópicos que dependen de la orientación del cristal. Sin embargo, en este caso, se han de usar otros métodos para generar el taladro o para determinar los cambios del estado de tensión sobre la superficie, por ejemplo un método de haces de iones para taladrado, y detectar la forma de superficie con un microscopio electrónico de barrido.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Un método para determinar el esfuerzo residual de una pieza de ensayo según un método de taladrado de agujeros, en el que, sobre una superficie de la pieza de ensayo, se realiza una retirada de material para generar un rebajo de material localmente delimitado y se detecta una forma superficial que cambia debido a la retirada de material y/o un estado de tensión de la superficie de la pieza de ensayo que cambia debido a la retirada de material, sobre cuya base se determina un valor de esfuerzo residual que sirve para determinar el esfuerzo residual de la pieza de ensayo que tenía la pieza de ensayo en el estado anterior a la retirada de material, **caracterizado** porque se realizan al menos dos retiradas de material, cada una con la misma profundidad de retirada de material,
- 10 los rebajos de material generados por las al menos dos retiradas de material se solapan lateralmente al menos de manera parcial con respecto a la superficie,
- después de cada retirada de material, se detectan la forma de superficie que ha cambiado en cada caso y/o el estado de tensión de la superficie que ha cambiado en cada caso y se determina un valor de esfuerzo residual en cada caso, y
- 15 sobre la base de los al menos dos valores de esfuerzo residual determinados, se detectan el esfuerzo residual y un error que aqueja al esfuerzo residual con respecto a la profundidad de retirada de material.
2. El método según la reivindicación 1, **caracterizado** porque el esfuerzo residual y cada valor de esfuerzo residual están caracterizados por una pluralidad de componentes, preferiblemente por tres componentes.
- 20 3. El método según la reivindicación 1 o 2, **caracterizado** porque por la al menos segunda retirada de material se expande un rebajo de material generado por la primera retirada de material.
4. El método según la reivindicación 3, **caracterizado** porque el rebajo de material se expande por retiradas de material concéntricas.
5. El método según la reivindicación 4, **caracterizado** porque el rebajo de material tiene un contorno redondo, en particular circular.
- 25 6. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado** porque la forma de superficie cambiante y/o el estado de tensión cambiante de la superficie se detectan de una manera sin contacto.
7. El método según la reivindicación 6, **caracterizado** porque la detección de la forma de superficie cambiante y/o el estado de tensión cambiante de la superficie se realiza por medio de métodos ópticos o electrodinámicos, en particular métodos de medición de corrientes parásitas.
- 30 8. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado** porque la forma de superficie cambiante y/o el estado de tensión cambiante de la superficie se detectan con uno o más sensores de tensión, en particular con uno o más calibres de tensión aplicados sobre la superficie de la pieza de ensayo, preferiblemente con una roseta extensométrica.
- 35 9. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, **caracterizado** porque, para determinar el esfuerzo residual sobre la base de la forma de superficie cambiante y/o el estado de tensión cambiante de la superficie, se realiza una calibración.
10. El método según la reivindicación 9, **caracterizado** porque la calibración se realiza mediante ensayos de calibración en piezas de ensayos con un estado de esfuerzo residual conocido, en particular con consideración de una estrategia de retirada de material usada.
- 40 11. El método según la reivindicación 9, **caracterizado** porque la calibración se realiza por medio del método de elementos finitos, en particular con consideración de una estrategia de retirada de material usada.
- 45 12. El método según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11, **caracterizado** porque el método de taladrado de agujeros es un método de taladrado de agujeros incremental, porque el esfuerzo residual y el error con el que este último está aquejado se determinan para una pluralidad de profundidades de retirada de material, y porque se prepara un perfil de profundidad para el esfuerzo residual, en cuyo perfil se asignan errores dependientes de la profundidad a los esfuerzos residuales determinados dependientes de la profundidad.

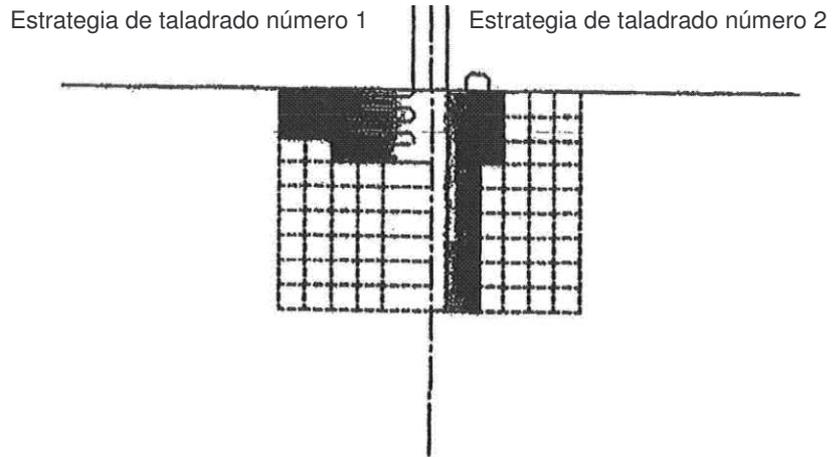


Fig. 1