

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 687 228**

51 Int. Cl.:

G06F 17/50 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.09.2013 PCT/EP2013/069096**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.04.2014 WO14060160**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.09.2013 E 13762824 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.07.2018 EP 2909760**

54 Título: **Método y sistema para la estimación de resistencia a grieta por fatiga probabilística**

30 Prioridad:

16.10.2012 US 201213652671

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

24.10.2018

73 Titular/es:

**SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT (100.0%)
Werner-von-Siemens-Strasse 1
80333 München, DE**

72 Inventor/es:

**AMANN, CHRISTIAN;
GRAVETT, PHILLIP W. y
KADAU, KAI**

74 Agente/Representante:

LOZANO GANDIA, José

ES 2 687 228 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).

MÉTODO Y SISTEMA PARA LA ESTIMACIÓN DE RESISTENCIA A GRIETA POR FATIGA PROBABILÍSTICA**DESCRIPCIÓN**

5 La presente invención se refiere a un método y un sistema para la estimación probabilística de resistencia a grieta por fatiga de un componente que se somete a tensión cíclica.

10 En una pluralidad de aplicaciones en sistemas técnicos, pueden someterse a tensiones piezas o componentes, tanto mecánicas como térmicas, que se alternan o varían a lo largo del tiempo. En tales casos pueden por ejemplo someterse piezas individuales a tensiones mecánicas directas con la aparición de fuerzas de compresión o de tracción. Una tensión térmica variable con el tiempo de este tipo surge, por otro lado, por ejemplo para las piezas o los componentes en un sistema de turbina, especialmente en una turbina de gas, cuando la turbina de gas está puesta en marcha o apagada.

15 Las cargas cíclicas extremas, tanto mecánicas como térmicas, dan como resultado fatiga de material, que, en muchos casos limitan la vida del componente. En general, el crecimiento de grieta por fatiga (FCG) con carga cíclica es a menudo el mecanismo limitador de vida de un componente. Grietas pequeñas normalmente se nuclean a partir de fisuras inherentes, tales como fisuras preexistentes en una pieza forjada, o se inician por otros mecanismos de inicio de grieta tales como fatiga a bajo número de ciclos (LCF). Durante cada ciclo, normalmente un inicio y
 20 apagado de un motor u otro cambio de estado de funcionamiento, crecen grietas pequeñas gradualmente sin afectar a la integridad estructural del componente. Esto se denomina crecimiento de grieta estable. Cuando los tamaños de grieta alcanzan un tamaño crítico, el crecimiento de grieta se vuelve inestable y el componente presenta fallo. El ciclo N en el que ocurre esto se denomina la resistencia a grieta por fatiga del componente. El crecimiento de grieta puede estimarse mediante mecánica de fractura elástica lineal (LEFM) conjuntamente con el campo de tensión transitorio apropiado del componente estimado por análisis de elementos finitos (FEA).

25 En la LEFM, las propiedades de material que son de extrema importancia para estimar la resistencia de mecánica de fractura son la tenacidad a la fractura ($K_{1c}(T)$) y la tasa de crecimiento de grieta ($da/dN(\Delta K, T, R)$), donde da =aumento de tamaño de grieta, dN =aumento de ciclo, ΔK =diferencia de factor de intensidad de tensión que caracteriza el ciclo de tensión, T =Temperatura, R =R-razón[tensión mínima/tensión máxima]. Extensiones de la LEFM que tienen en cuenta efectos no lineales requieren adicionalmente propiedades de tracción, tales como resistencia al estiramiento (RP02), resistencia al estiramiento a la rotura (RM) y módulo de Young (E). Ejemplos conocidos de estas extensiones son el diagrama de evaluación de fallos (FAD) y la extensión de zona plástica de Irwin (IPZE).

30 Además, es necesario conocer tamaños de fisura iniciales con el fin de realizar un cálculo de LEFM. Una vez que se conocen estos parámetros, la resistencia a grieta por fatiga N puede calcularse aproximando la grieta por una solución de placa de, por ejemplo, una grieta de superficie semielíptica o incrustada elíptica.

35 Las medidas muestran que todas esas propiedades de material y tamaños de fisura iniciales tienen una dispersión intrínseca debido a la complejidad de la fabricación de piezas. Además, el envejecimiento de propiedades de material depende en gran medida del funcionamiento del componente individual, la microestructura de material inicial y la composición química y por tanto llevan a una dispersión diferente en las propiedades de material del componente envejecido. Debido a las incertezas en las propiedades de material y tamaños de fisura iniciales, la estimación de la resistencia de mecánica de fractura es complicada. Por tanto, muchos componentes ni siquiera están diseñados para un crecimiento de grieta por fatiga, o se hacen suposiciones extremadamente conservadoras. Esto puede llevar a un diseño muy conservador que no usa todo el potencial de un componente.

40 Ahora se describirán dos enfoques del estado de la técnica para el cálculo de resistencia a grieta por fatiga.

45 El primer enfoque implica el cálculo de resistencia de mecánica de fractura determinista basándose en propiedades de material y tamaños de fisura mínimos/máximos. Este enfoque se encuentra dentro de la denominada filosofía de diseño de duración segura y se usa principalmente para turbinas de gas y de vapor de alto rendimiento con base terrestre. En este enfoque, se usan estimaciones conservadoras de propiedades de material y tamaños de fisura. Por ejemplo, la tenacidad a la fractura (K_{1c}) se estima mediante una curva mínima con la mayor parte de los datos medidos con valores K_{1c} mayores. Para la tasa de crecimiento de grieta (da/dN) se estima una curva máxima con la mayor parte de los datos medidos con valores menores. El tamaño de fisura se estima normalmente mediante la resolución de la técnica de examen no destructivo (NDE) que se realiza antes de que se use el componente en un motor o durante una extensión de vida útil (LTE).

50 Con las suposiciones del "peor caso" descritas anteriormente, la resistencia a grieta por fatiga N puede estimarse de manera conservadora mediante LEFM, o las extensiones mencionadas anteriormente tales como análisis de FAD e IPZE para una ubicación del componente. La ubicación proporciona la entrada de tensión/temperatura para el análisis de LEFM. Esta ubicación, o a veces múltiples ubicaciones, se elige de tal manera que es la ubicación limitador de vida, es decir que tiene los mayores valores de tensión y amplitud. Entonces, se supone que el número de ciclo N en el que el crecimiento de grieta se vuelve inestable es la resistencia a grieta por fatiga del componente.

A veces se aplica todavía otro factor de seguridad o bien en N o bien en otra parte.

El inconveniente de un cálculo de mecánica de fractura determinista de este tipo es que la calidad de un componente solamente se basa en una única o sólo unas pocas ubicaciones del componente y propiedades de material mínimas/máximas. La información sobre datos de material y dispersión de tamaño de fisura no se usa en absoluto. Además, debido a la dispersión de parámetros de entrada todavía habrá una probabilidad muy baja de fallo (PoF) que el componente tiene para el número de ciclos N calculado. La PoF no se determina por el método determinista ya que sólo usa estimaciones de tamaño de fisura/propiedad mínimas/máximas.

El segundo enfoque implica el cálculo de mecánica de fractura probabilística basándose en la distribución de tamaño de fisura y distribuciones de intervalos de inspección. Esto se usa particularmente en la industria de aeromotores. Con este fin, se ha desarrollado una herramienta DARWIN™ (Design Assessment of Reliability with Inspection) que calcula la probabilidad de fallo (PoF) acumulada como una función de ciclos N. Esta metodología se centra en la influencia de intervalos de inspección, distribución de tamaño de fisura inicial y la mezcla de diferentes misiones tales como arranque, ascenso, vuelo a velocidad de crucero a diferente altitud, cambios en vuelo de altitud, aterrizajes frustrados, etc. Este enfoque no representa las variaciones de propiedad de material. Sin embargo, el usuario puede añadir una amplitud de la distribución de vida útil $\langle N \rangle$. Esta amplitud de la distribución de vida útil puede estimarse mediante una serie de pruebas complejas que combinan toda la dispersión de material individual en diferentes condiciones de carga o la amplitud no se considera importante y se establece a 0. Entonces, el usuario tiene que definir un número limitado de zonas espaciales dentro del modelo de elementos finitos (FEM). En cada una de estas zonas se define una grieta y se realiza un número limitado de cálculo de crecimiento de grieta por fatiga de LEFM que representan la posible distribución de tamaño de fisura. A cada zona i se le asigna de ese modo una probabilidad de fallo PoF (N_i), la PoF total (N) se calcula entonces basándose en una suma compleja de la PoF individual (N_i). El número total de cálculos de LEFM realizados se limita a medida que el problema se vuelve más complejo computacionalmente y aumentan los tiempos de ejecución. Para PoF bajas esto puede llevar a errores en la estimación de la PoF ya que detalles de la superficie de fallo pueden no resolverse correctamente.

El inconveniente del segundo enfoque es que no representa la dispersión de material individual y evalúa el riesgo para cada zona mediante una grieta representativa, es decir el usuario pone la grieta en una ubicación en cada zona que piensa que es representativa de toda la zona. Por tanto, ha de realizarse una comprobación de convergencia de refinamiento de zona para ver si los resultados siguen dependiendo del tamaño de zona.

Además, P. Kantzos *et al.* dan a conocer en "Effect of Powder Cleanliness on the Fatigue Behavior of Powder Metallurgy Ni-Disk Alloy UDIMET 720", SUPERALLOYS 2004 (TENTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM), 1 de enero de 2004, páginas 409-417, una simulación de Monte Carlo del procedimiento de inoculación, que se desarrolló conjuntamente con HLS, y datos metalográficos del material inoculado, donde el objetivo principal de la simulación es determinar las distribuciones esperadas de fisuras iniciadoras. Su modelo puede predecir las distribuciones de fisura esperadas en la superficie e internamente para las barras de fatiga sometidas a prueba. El objeto de la presente invención es proporcionar una técnica mejorada para la estimación de resistencia a grieta por fatiga probabilística que obvie al menos algunos de los inconvenientes del estado de la técnica mencionados anteriormente.

El objeto anterior se logra mediante las características de las reivindicaciones independientes. Se proporcionan desarrollos ventajosos adicionales mediante las reivindicaciones dependientes.

Al contrario que el estado de la técnica mencionado anteriormente, la presente invención tiene en cuenta la dispersión de tanto propiedades de material como tamaño de fisura. Con este fin, el método propuesto incorpora todas las distribuciones de propiedad de material, distribuciones de tamaño de fisura y ubicaciones de componente para determinar una probabilidad de fallo PoF(N), que es el riesgo de fallo acumulado para N ciclos. En las realizaciones ilustradas, el criterio de fallo usado es inestabilidad de grieta. Este es distinto del criterio de fallo de iniciación de grieta.

El método propuesto define un gran número de muestras o representaciones de componentes. Cada muestra es una representación del componente que se define por una condición de material y una condición de tamaño de fisura posibles del componente, obtenidas a partir de datos de dispersión de propiedad de material y datos de dispersión de tamaño de fisura del componente. En una realización, el método propuesto se realiza mediante una metodología de Monte-Carlo. En un escenario a modo de ejemplo, el número de tales representaciones estaría en el intervalo de millones a billones. Puede suponerse que cada representación individual tiene la misma probabilidad de aparición (colectividad microcanónica). Cada condición de representación está configurada sacando valores de representación a partir de distribuciones de propiedad de material individuales (o datos de dispersión). En las realizaciones ilustradas, se supone que la distribución de posición de fisura es constante, es decir cada elemento de volumen en el componente tiene la misma probabilidad de tener un defecto.

Para cada representación individual, se selecciona una ubicación de componente. Entonces, se hace una determinación de si dicha representación individual presenta fallo después de un número dado de ciclos N, basándose en la determinación de un crecimiento de grieta en la ubicación seleccionada. El crecimiento de grieta se

determina basándose en la condición de material y la condición de tamaño de fisura en la ubicación seleccionada. Se determina el fallo de la representación individual si se determina que el crecimiento de grieta es inestable. Se determina una suma total del número de las representaciones que presentaron fallo después de N ciclos. A partir de esto, se determina una probabilidad de fallo del componente después de N ciclos como $PoF(N) = Nf/S$, en que:

5 PoF(N) es la probabilidad de fallo del componente después de N ciclos,
 Nf es la suma total del número de representaciones que se determina que han presentado fallo después de N ciclos,
 10 y
 S es el número total de representaciones.

En una realización adicional, se genera un mapa de fallos después de un número predeterminado de ciclos, indicando el mapa de fallos el número de representaciones con fallo en un área.

15 En una realización, el cálculo de crecimiento de grieta para cada una de las representaciones se hace basándose en un análisis de LEFM. Con este fin, las propiedades de material del componente que se consideran incluyen al menos tenacidad a la fractura (K_{Ic}) y tasa de crecimiento de grieta (da/dN).

20 En una realización adicional, pueden tenerse en cuenta propiedades de material adicionales tales como resistencia al estiramiento (RP02) y/o resistencia al estiramiento a la rotura (RM) y/o módulo de Young (E) para definir la condición de componente. En tales casos, pueden usarse extensiones de LEFM tales como FAD o IPZE para la determinación de crecimiento de grieta.

25 En una realización, se genera un mapa de estado transitorio crítico del componente basándose en la condición de material del componente, en la que el mapa de estado transitorio crítico representa una distribución de tensión y temperatura del componente en que a cada ubicación de componente se le asigna un valor de tensión crítica y un valor de temperatura crítica.

30 En una realización, se describe la distribución tensión/temperatura del componente por un FEA y se introduce por lectura mediante el código para un análisis de mecánica de fractura (tal como LEFM o FAD o IPZE). El código asigna automáticamente para cada ubicación valores de tensión/temperatura críticos a partir de un FEA transitorio (cíclico) que registran el análisis de mecánica de fractura posterior.

35 En una realización, cada representación individual puede tener una distribución de tensión y temperatura ligeramente diferente que representa incertezas en las condiciones de tensión/temperatura.

En una realización adicional, también pueden considerarse ligeras variaciones en geometría que pueden proporcionarse en cada representación que representan tolerancias de fabricación.

40 En una realización, el crecimiento de grieta se computa mediante una integración numérica de una tasa de crecimiento de grieta da/dN , donde 'da' designa un aumento de tamaño de grieta y 'dN' designa un aumento de ciclo, en la que la integración se lleva a cabo usando un esquema de integración Runge-Kutta modificado que siempre sobreestima el crecimiento de grieta independientemente del tamaño de etapa de integración.

45 El esquema de integración anterior permite una estimación conservadora del crecimiento de grieta en una (o unas pocas si se desea) etapa de integración. Si, después de esta estimación conservadora del crecimiento de grieta para el número total de ciclos, la grieta es todavía estable, no hay necesidad adicional de evaluar el crecimiento de grieta ya que el componente no presentará fallo para esta representación particular. El tiempo de cálculo de estas grietas estables puede reducirse significativamente (normalmente, un factor de 1000).

50 El tamaño de fisura, tal como se midió mediante técnicas de NDE resulta ser menor o mayor que el tamaño de fisura real o verdadero, a menudo por varias órdenes de magnitud.

55 Por consiguiente, en una realización, la condición de tamaño de fisura de una ubicación seleccionada de una representación individual se obtiene a partir de unos datos de distribución de tamaño de fisura verdadero, en la que se determinan los datos de distribución de tamaño de fisura verdadero basándose en:

- 60 – datos de distribución de tamaño de fisura indicados por NDE,
- una probabilidad de detección 'PoD' de dicha técnica de NDE, y
- datos de distribución de factor de conversión, en que se define el factor de conversión como $k = TFS/KSR$,

65 donde

K designa el factor de conversión

TFS designa un tamaño de fisura verdadero, y

5 KSR designa el tamaño de fisura indicado por NDE.

En una realización adicional, la distribución de la razón $k = TFS/KSR$ se incorpora en los análisis de mecánica de fractura mediante un método de Monte-Carlo. Según esta realización, los datos de distribución de tamaño de fisura verdadero se determinan como:

10

$$\{TFS\} = PoD_{MC} [\{KSR\} \otimes \{k\}]$$

donde

15 $\{TFS\}$ designa datos de distribución de tamaño de fisura verdadero,

$\{KSR\}$ designa datos de distribución de tamaño de fisura indicados por NDE,

20 $\{k\}$ designa datos de distribución de factor de conversión,

\otimes designa una operación de multiplicación de Kronecker, y

PoD_{MC}[conjunto de datos] es una operación de Monte-Carlo que intercambia datos de cero o datos de valor pequeño en [conjunto de datos] con datos distintos a cero que representan fisuras no detectadas tal como se describe por la probabilidad de detección de la técnica de NDE.

25

En una realización adicional, con el fin de determinar el riesgo por inicio, el método incluye además determinar una función de riesgo o riesgo por ciclo, como

30

$$H(N+1) = (PoF(N+1) - PoF(N)) / (1 - PoF(N)),$$

donde

35 H es la función de riesgo o riesgo por ciclo,

N es el número de ciclos,

PoF es la probabilidad de fallo.

40 En otro aspecto, se proporciona un método para hacer funcionar un componente con tensión cíclica. El método incluye planificar un intervalo de interrupción del funcionamiento o de mantenimiento de dicho componente teniendo en cuenta una resistencia a grieta por fatiga probabilística del componente tal como se estima por cualquiera de las realizaciones descritas anteriormente.

45 En todavía otro aspecto, se proporciona un sistema que comprende medios adecuados para llevar a cabo el método según cualquiera de las realizaciones descritas anteriormente.

La presente invención se describe adicionalmente a continuación en el presente documento con referencia a realizaciones ilustradas mostradas en los dibujos adjuntos, en los que:

50

la figura 1 es una ilustración esquemática de la geometría de una modelo de grieta de superficie semielíptica,

la figura 2 es un gráfico de ejemplo que ilustra la evolución de intensidad de tensión máxima durante un cálculo de grieta por fatiga cíclico para un modelo de grieta de superficie tal como se muestra en la figura 1,

55

la figura 3 es un gráfico de ejemplo que ilustra la evolución de tamaño de grieta durante un cálculo de grieta por fatiga cíclico para un modelo de grieta de superficie tal como se muestra en la figura 1,

60

la figura 4 es un gráfico de ejemplo que muestra una curva de valor medio de tenacidad a la fractura y también los valores reales trazados,

la figura 5 es un gráfico de ejemplo que muestra una curva de valor medio de tasa de crecimiento de grieta y valores reales trazados,

65 la figura 6 es un gráfico de ejemplo que muestra una curva de valor medio de módulo de Young y valores reales,

la figura 7 es un gráfico de ejemplo que muestra curvas de valor medio de resistencia al estiramiento a la rotura y al estiramiento y valores reales,

5 la figura 8 es una ilustración esquemática de un sistema para la estimación de resistencia a grieta por fatiga probabilística según una realización,

la figura 9 es un diagrama de flujo que ilustra un método para la estimación de resistencia a grieta por fatiga probabilística según una realización,

10 la figura 10 es un gráfico de ejemplo que ilustra la probabilidad de detección 'PoD' como una función de tamaño de fisura verdadero 'TFS' para técnicas de inspección ultrasónicas actuales,

15 la figura 11 es una representación de ejemplo de la dispersión del factor de conversión k,

la figura 12 es un gráfico de ejemplo que muestra las distribuciones de tamaño de fisura de KSR, de KSR convertido y verdadero,

20 la figura 13 es una ilustración esquemática de la geometría de un modelo de grieta de superficie de pared pasante,

la figura 14 es un gráfico de ejemplo que muestra una determinación numérica de tamaño de grieta dependiente del tamaño de etapa de integración,

25 la figura 15 es un gráfico de ejemplo que ilustra una función de probabilidad de fallo $PoF(N)$,

la figura 16 es un gráfico de ejemplo que ilustra una función de riesgo $H(N)$,

la figura 17 muestra un ejemplo de la distribución de densidad de fisura radial,

30 las figuras 18A-D muestran mapas de estado transitorio crítico a modo de ejemplo,

las figuras 19A-E muestran respectivamente la evolución de tiempo en una ubicación del componente para las cantidades siguientes, concretamente, velocidad angular, temperatura, tensión, tenacidad a la fractura, tenacidad a la tensión/fractura, y

35 la figura 20 muestra un ejemplo de un mapa de fallos después de un número determinado de ciclos de funcionamiento.

40 Las realizaciones ilustradas a continuación proporcionan una estimación de resistencia a grieta por fatiga de un componente basándose en la mecánica de fractura probabilística de simulación directa. El método propuesto realiza un gran número de simulaciones de mecánica de fractura individuales para determinar la distribución de vida útil $\langle N \rangle$ y por tanto la probabilidad de fallo $PoF(N)$ de un componente. Las realizaciones ilustradas usan una metodología de Monte-Carlo que se define por un gran número de muestras o representaciones S (normalmente, S es del orden de millones a billones), cada una de las cuales representa una condición de componente posible. Cada

45 condición de una representación se define sacando valores a partir de distribuciones de material y distribución de tamaño de fisura. Se lleva a cabo un análisis de mecánica de fractura (por ejemplo, LEFM o sus extensiones tales como IPZE o FAD) para cada una de este gran número de representaciones, que determina si cada una de estas representaciones presenta fallo o no después de un número dado de ciclos N, basándose en un cálculo de crecimiento de grieta. A partir de esto, la $PoF(N)$ se determina determinando el número de representaciones N_f que presentaron fallo después de N ciclos, y dividiendo el número N_f entre el número total de representaciones S.

50 Las realizaciones ilustradas son particularmente adecuadas para la estimación de resistencia a grieta por fatiga de componentes de rotor forjados de generadores y turbinas de vapor y de gas industriales de alto rendimiento. La presente invención también puede aplicarse a otros componentes de turbinas industriales de alto rendimiento tales como palas, paletas, transiciones, componentes de carcasa, etc., así como a diversos componentes, tales como

55 componentes de turbinas de gas industriales más pequeñas, aeromotores, aeronave, piezas de turbina eólica tales como palas, recipientes a presión y tuberías, elementos electrónicos semiconductores tales como microchips, etc.

60 En las realizaciones ilustradas, los criterios para determinar un fallo es la inestabilidad de grieta. Se nuclean grietas a partir de fisuras inherentes, tales como fisuras preexistentes en una pieza forjada, o se inician por otros mecanismos de inicio de grieta tales como la fatiga a bajo número de ciclos (LCF). Durante la carga cíclica, por ejemplo durante un inicio y apagado de un motor u otro cambio de estado de funcionamiento, las grietas crecen gradualmente hasta que se alcanza un tamaño de grieta crítico cuando el crecimiento de grieta se vuelve inestable y afecta a la integridad estructural del componente, dando como resultado un fallo del componente. Un fallo de este

65 tipo puede determinarse calculando el crecimiento de grieta, por ejemplo mediante un modelo de grieta de superficie semielíptica tal como se ilustra en la figura 1. El tamaño de grieta crítico puede determinarse empíricamente o

experimentalmente.

Haciendo referencia a la figura 1, la grieta de superficie semielíptica se representa mediante los dos semiejes a y c . La evolución de intensidad de tensión máxima durante un cálculo de grieta por fatiga cíclico para un modelo de grieta de superficie de este tipo se muestra en la figura 2. En la figura 2, el eje Y representa la intensidad de tensión mínima K , mientras que el eje X representa el número de ciclos. Las curvas 21 y 22 representan respectivamente la evolución de intensidad de tensión máxima a lo largo de los ejes c y a . El valor de tenacidad a la fractura K_{Ic} se representa mediante la línea de puntos 23. Tal como se ve, la grieta se vuelve inestable cuando la intensidad de tensión máxima a lo largo de cualquiera de los ejes a o c excede el valor de tenacidad a la fractura. El número de ciclos en los que esto se produce es la resistencia a grieta por fatiga. Esto se muestra mediante la línea de puntos 24.

La figura 3 muestra la evolución de tamaño de grieta durante un cálculo de grieta por fatiga cíclico para el modelo de grieta de superficie descrito anteriormente. En el presente documento, el eje Y representa el tamaño de grieta, mientras que el eje X representa el número de ciclos. Las curvas 31 y 32 representan respectivamente la evolución de tamaño de grieta a lo largo de los ejes c y a . La resistencia a grieta por fatiga se ilustra mediante la línea vertical de rayas 33.

Aunque se ilustra un modelo de grieta de superficie en el presente documento, los cálculos de crecimiento de grieta por fatiga de grietas incrustadas o de esquina son similares usando soluciones de factor de intensidad de tensión diferentes.

Tal como se observó anteriormente, la determinación de la resistencia de mecánica de fractura por LEFM depende del conocimiento de determinadas propiedades de material, que incluye al menos la tenacidad a la fractura K_{Ic} y la tasa de crecimiento de grieta da/dN . Extensiones de LEFM tales como FAD o IPZE incorporan propiedades de material adicionales tales como resistencia al estiramiento (RP02) y/o resistencia al estiramiento a la rotura (RM) y/o módulo de Young (E). Además, es necesario conocer tamaños de fisura iniciales con el fin de realizar un cálculo de LEFM. El término "tamaño de fisura" tal como se usa en esta descripción se refiere a un tamaño de fisura inicial o preexistente antes del comienzo de la carga cíclica.

De nuevo, tal como se observó anteriormente, las propiedades de material y tamaños de fisura tienen dispersión intrínseca, por ejemplo, debido a la complejidad del procedimiento de fabricación. En las figuras 4-7, se ilustran datos de dispersión a modo de ejemplo que pertenecen a un componente de acero de rotor de una turbina de gas, en las que se muestran valores reales medidos, junto con curvas de propiedad de material de valor medio (valor predicho) del componente. Los valores reales pueden incluir, por ejemplo, datos de pruebas de material o datos de remuestreo adicionales basándose en el ajuste de datos de material a distribuciones.

La figura 4 muestra un ejemplo de datos de dispersión (es decir, valores reales) de tenacidad a la fractura, mostrando también una curva de valor medio de tenacidad a la fractura. En el presente documento el eje Y representa la tenacidad a la fractura, mientras que el eje X representa la temperatura. La curva de tenacidad a la fractura de valor medio se designa como 41, mientras que el dato real se representa por 42.

La figura 5 muestra un ejemplo de datos de dispersión (es decir, valores reales) de crecimiento de grieta, mostrando también curvas de valor medio de crecimiento de grieta. En el presente documento el eje Y representa el crecimiento de grieta da/dN , mientras que el eje X representa un cambio en intensidad de tensión dK . La curva 51 representa la curva de valor medio de crecimiento de grieta en $T=20C$, $R=0,5$. La curva 52 representa la curva de valor medio de crecimiento de grieta en $T=300C$, $R=0,1$. La curva 53 representa la curva de valor medio de crecimiento de grieta en $T=20C$, $R=0,1$. La curva 54 representa la curva de valor medio de crecimiento de grieta en $T=20C$, $R=-1$. El dato real en $T=-40C$, $R=0,1$ se designan como 55. En el presente documento, T = temperatura y R =razón[tensión mínima/tensión máxima].

La figura 6 muestra un ejemplo de datos de dispersión (es decir, valores reales) de módulo elástico o módulo de Young, mostrando también una curva de valor medio de módulo elástico. En el presente documento el eje Y representa el módulo elástico, mientras que el eje X representa la temperatura. La curva de módulo elástico de valor medio se designa como 61, mientras que el dato real se representa por 62.

La figura 7 muestra un ejemplo de datos de dispersión (es decir, valores reales) de resistencia al estiramiento y resistencia al estiramiento a la rotura, mostrando también una curva de valor medio de resistencia al estiramiento y una curva de valor medio de resistencia al estiramiento a la rotura. En el presente documento el eje Y representa resistencia al estiramiento y resistencia al estiramiento a la rotura, mientras que el eje X representa temperatura. La curva de resistencia al estiramiento de valor medio se designa como 71, mientras que el dato real se representa por 72. La curva de resistencia al estiramiento a la rotura de valor medio se designa como 73, mientras que el dato real se representa por 74.

Los métodos del estado de la técnica no tienen en cuenta la dispersión de datos de propiedad de material, sino que en su lugar tienen en cuenta un valor medio de estas propiedades (tal como se ve en las figuras 4-7) o a veces

incluso una curva de valor mínimo o máximo de las propiedades respectivas, que incorpora un factor de seguridad deseado. Además, ninguno de los métodos del estado de la técnica incorpora la dispersión en tamaño de fisura.

5 En cambio, las realizaciones de la presente invención incorporan todas las distribuciones de propiedad de material, las distribuciones de tamaño de fisura y las ubicaciones de componente.

10 La figura 8 ilustra esquemáticamente un sistema 80 para la estimación de resistencia a grieta por fatiga de un componente basándose en la mecánica de fractura probabilística de simulación directa, según una realización de la presente invención. El sistema 80 ilustrado es un sistema informático que comprende una memoria 81, medios 82 de procesamiento y un dispositivo 83 de entrada-salida. La memoria 81 almacena todos los datos de dispersión de propiedad de material (tal como se representa en las figuras 4-7) y los datos de dispersión de tamaño de fisura. Adicionalmente, la memoria 81 puede almacenar también campos de tensión-temperatura. Los medios 82 de procesamiento incluyen una pluralidad de módulos o bloques funcionales que pueden implementarse en hardware y/o software, normalmente una combinación de ambos. Estos módulos incluyen un módulo 84 de mecánica de fractura, un módulo 88 de FEA, un módulo 85 de computación, un módulo 86 de I/O y una pluralidad de bibliotecas 87, que incluyen bibliotecas que manejan la gestión de memoria del campo de tensión/temperatura, bibliotecas que manejan las propiedades de material, bibliotecas para manejar NDE (tal como ultrasonido) e información de fisura, y bibliotecas de tablas de consulta de alto rendimiento. Las bibliotecas pueden estar enlazadas entre sí en un ejecutable. El funcionamiento de estos bloques funcionales se describe en referencia al diagrama de flujo mostrado en la figura 9.

15 La figura 9 ilustra un método 90 para la estimación de vida de grieta basándose en la mecánica de fractura probabilística de simulación directa, según una realización de la presente invención. El método 90 utiliza datos de dispersión de propiedades de material y tamaños de fisura además de campos de tensión y temperatura. Esto puede incluir, por ejemplo distribución 90a de crecimiento de grieta de material da/dN (dK), distribución 90a de temperatura de FEA transitoria, distribución 90b de tensión de FEA transitoria y distribución 90d de tenacidad a la fractura $K_{1c}(T)$. Datos de dispersión adicionales pueden incluir la distribución 90e de módulo de Young $E(T)$, la distribución 90f de resistencia al estiramiento a la rotura $RM(T)$ y la distribución 90g de resistencia al estiramiento $RP02(T)$.

20 El método usa también datos de dispersión que pertenecen al tamaño de fisura que incluye la distribución 90h de tamaño indicado por NDE (KSR), probabilidad de distribución (PoD) de técnica 90i de NDE y la distribución 90j de factor de conversión ($k=TFS/KSR$).

25 Haciendo de nuevo referencia a la figura 8, los datos de dispersión observados anteriormente pueden almacenarse en la memoria 81 y manejarse por las bibliotecas 87 respectivas. A partir de los datos de dispersión de tamaño de fisura y propiedad de material, puede describirse un gran número de representaciones del componente (normalmente del orden de millones a billones). Cada representación se define por una condición de material y una condición de tamaño de fisura posibles asociadas con el componente, configurándose cada condición sacando valores a partir de dichos datos de distribución (dispersión).

30 Haciendo de nuevo referencia a la figura 9, en el bloque 91a, se genera un mapa de estado transitorio crítico del componente basándose en la condición de material del componente. El mapa de estado transitorio crítico representa una distribución de tensión y temperatura del componente donde a cada ubicación de componente se le asigna un valor de tensión crítica y un valor de temperatura crítica. Esto puede llevarse a cabo, por ejemplo mediante el módulo de FEA de la figura 1.

35 En el caso de que se aborde un problema transitorio, tal como un ciclo de inicio-apagado de un motor, es necesario identificar estados de temperatura y tensión críticos para cada ubicación r dentro del componente durante el ciclo. En general, estos estados críticos son en diferentes tiempos t para diferentes ubicaciones r .

40 El tiempo crítico $t_{K_{1c-crit}}(r)$ para cada ubicación r (y por tanto tensión $\sigma_{K_{1c-crit}}(r)$ y temperatura $T_{K_{1c-crit}}(r)$ críticas) para un crecimiento de grieta estable descrito por la tenacidad a la fractura $K_{1c}(r, T)$ del componente puede expresarse como:

45

$$t_{K_{1c-crit}}(r) = t \left(\max \left(\frac{\sigma(r, t)}{K_{1c}(r, T(r, t))} \right) \right) \quad \text{ecuación (1)}$$

50

El estado crítico local usado para evaluar la tasa de crecimiento de grieta se define por la temperatura máxima $T_{m\acute{a}x}(r)$ y amplitud de tensión máxima $\Delta \sigma(r) = \sigma_{m\acute{a}x}(r) - \sigma_{m\acute{i}n}(r)$ durante el ciclo transitorio:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{máx}}(r) &= \text{máx}(\sigma(r, t)) \\ \sigma_{\text{mín}}(r) &= \text{mín}(\sigma(r, t)) \\ T_{\text{máx}}(r) &= \text{máx}(T(r, t))\end{aligned}\tag{ecuación (2)}$$

5 Haciendo de nuevo referencia a la figura 9, en el bloque 91b, se calcula la distribución de tamaño de fisura verdadero basándose en la distribución 90h de datos de tamaño de fisura de NDE, la probabilidad 90i de detección y la distribución 90j de factor de conversión.

10 En cuanto a la probabilidad 90i de detección PoD, se conoce que se describen las técnicas de NDE por una curva de probabilidad de detección (PoD), que da información sobre la probabilidad de detectar una fisura de un tamaño determinado (el tamaño de fisura verdadero o TFS) durante una inspección de este tipo. La figura 10 muestra un ejemplo de una curva 101 de PoD de este tipo para unas pruebas ultrasónicas realizadas durante la cualificación de piezas forjadas de rotor grandes (discos y árboles) que muestra la relación entre el tamaño de fisura verdadero TFS (representado a lo largo del eje X) y la probabilidad de detección PoD (representada a lo largo del eje Y). La figura 11 muestra una dispersión a modo de ejemplo de los valores 111 de factor de conversión k.

15 Haciendo de nuevo referencia a la figura 9 (bloque 91b), si están disponibles una descripción funcional de las distribuciones de los valores de KSR observados ($f_{\text{KSR}}(t)$, valor de t :KSR) y el factor de conversión k (f_k), así como la probabilidad de detección (PoD) para la técnica de NDE, la distribución de TFS ($f_{\text{TFS}}(z)$, z : valor de TFS) puede calcularse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}f_{\text{TFS}_{\text{noPoD}}}(z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{|t|} f_{\text{KSR}}(t) \cdot f_k\left(\frac{z}{t}\right) dt \\ f_{\text{TFS}}(z) &= \frac{f_{\text{TFS}_{\text{noPoD}}}(z)}{\text{PoD}(z)}\end{aligned}\tag{ecuación (3)}$$

20 En la práctica, las distribuciones se dan a menudo mediante conjuntos de datos (es decir, valores medidos), que pueden expresarse mediante distribuciones discretas. En este caso, la datos de distribución de TFS {TFS} pueden calcularse usando la multiplicación de Kronecker entre los datos de KSR {KSR} y los datos de factor de conversión k {k}, así como una operación de Monte-Carlo $PoDMC[\{\text{conjunto de datos}\}]$ que intercambia datos de cero (o datos de valor pequeño) en {conjunto de datos} con datos distintos a cero (que representan fisuras no detectadas tal como se describe por la PoD) con:

$$\{TFS\} = PoD_{MC}[\{KSR\} \otimes \{k\}]\tag{ecuación (4)}$$

30 En el caso de piezas forjadas grandes, las pruebas ultrasónicas (UT) puede ser la técnica de NDE de volumen de preferencia, además de diversas técnicas de NDE relacionadas con defecto de superficie. La figura 12 muestra datos de distribución de tamaño de fisura para un componente de rotor de turbina de gas, en la que la curva 121 representa la distribución de KSR, la curva 122 representa la distribución de KSR convertida y la curve 123 representa la distribución de TFS. La distribución de TFS se calculó utilizando la ecuación (4).

35 Para la cualificación de un componente, a menudo se define un tamaño de indicación máximo. Si una indicación de NDE es mayor que este tamaño de indicación máximo, no se aceptará en general el componente para su uso. Tal criterio de aceptación puede implementarse también en el método ilustrado anteriormente para eliminar, hasta cierto punto (dependiendo de la PoD, véase la figura 11), fisuras grandes.

40 Haciendo de nuevo referencia a la figura 9, el método 90 puede incluir una etapa adicional de determinar la distribución de forma de grieta. Entonces, se utilizan los datos del mapa 91a de estado transitorio crítico, la distribución 91b de TFS y la distribución 91c de forma de grieta mediante el módulo de mecánica de fractura para determinar la resistencia a grieta por fatiga del componente calculando el crecimiento de grieta para cada muestra o representación y determinar si el crecimiento de grieta de esa representación se vuelve inestable para cualquier número de ciclos N dado.

45 El modelo de grieta inicial puede ser una grieta elíptica incrustada descrita por dos parámetros a y c . Inicialmente, puede usarse una distribución de a/c para dibujar la forma de cada grieta inicial. Además, se implementa un modelo que describe la transición de una grieta incrustada a una grieta de superficie. Cuando la grieta se acerca a la superficie del componente durante el crecimiento de grieta, la grieta puede convertirse en una grieta de superficie. La implementación de un modelo de superficie de este tipo necesita información sobre la posición y la orientación con respecto a la superficie del componente.

55

De esta manera, se establece un bucle en S muestras (bloque 92), donde S=número total de muestras, que puede ser del orden de millones a billones en el ejemplo ilustrado. Tal como se mencionó anteriormente, cada muestra o representación representa una condición de material y una condición de tamaño de fisura posibles del componente, definiéndose la condición sacando valores de representación a partir de los datos de distribución respectivos.

Se supone que cada muestra o representación individual tiene la misma probabilidad de aparición (colectividad microcanónica) y representa una condición de posición y tamaño de fisura y material posible del componente en el parque. En el ejemplo ilustrado, la distribución de posición de fisura tiene una dependencia radial tal como se muestra en la figura 17, que refleja la densidad de fisura más grande hacia el centro de una pieza forjada. La figura 17 muestra un ejemplo de la distribución de densidad de fisura radial para el componente investigado (en este caso, un disco de rotor de turbina de gas). La figura 17 es un gráfico de densidad de fisura (eje Y) frente a la posición radial (eje X). Las curvas 171, 172 y 173 muestran respectivamente la densidad promedio de KSR en la base de datos, la densidad promedio de TFS en la base de datos y la densidad de KSR radial especificada por el usuario. Las curvas 174 y 175 muestran una densidad de KSR simulada y una densidad de TSF simulada.

Haciendo de nuevo referencia a la figura 9, bloque 93, una ubicación de componente (es decir, un elemento de volumen del componente) se selecciona de manera aleatoria. Los estados críticos (temperatura y tensión) de la ubicación de componente seleccionada puede introducirse por lectura a partir del módulo de FEA en el módulo de mecánica de fractura. Tal como se mencionó anteriormente, el módulo de FEA asigna automáticamente para cada ubicación valores de tensión/temperatura críticos a partir de un FEA transitorio (cíclico) que caen dentro del análisis de mecánica de fractura. Además, cada representación individual puede tener una distribución de tensión y temperatura ligeramente diferente que representa incertezas en las condiciones de tensión/temperatura. Asimismo, también pueden considerarse ligeras variaciones en la geometría que representan tolerancias de fabricación.

En una realización, para cada ubicación durante el ciclo de funcionamiento, puede describirse el estado de tensión por un tensor del tipo 2 en tres dimensiones S_{ij} . Para fines de mecánica de fractura, existen múltiples enfoques sobre cómo tratar la descripción tensorial del estado de tensión en un componente. Para discos de rotor a menudo la tensión circunferencial se elige para la descripción de mecánica de fractura. Se implementó un procedimiento que extrae la cantidad de tensión relevante para cada ubicación proyectando el tensor de tensión en la dirección de tensión principal máxima durante el ciclo de interés. Esto elimina conjeturas sobre qué componente de tensión es relevante. Si, por algún motivo, sólo determinados elementos del tensor de tensión están disponibles, pueden usarse también otras componentes de tensión especificadas por el usuario. El procedimiento garantiza extraer para cada ubicación del componente la componente de tensión más crítica y elimina conjeturas y dificultades en componentes de tensión diferentes.

En las figuras 18A-18D se muestran ejemplos de mapas de estado críticos. En estos ejemplos, el componente investigado incluye un modelo simétrico de eje en 2D de un disco de rotor de turbina de gas.

La figura 18A muestra un mapa de ejemplo de la amplitud de tensión máxima durante un ciclo de funcionamiento para el componente investigado. Ha de observarse que, en el presente documento, esta tensión se usa para determinar la tasa de crecimiento de grieta.

La figura 18B muestra un mapa de ejemplo de la temperatura máxima durante un ciclo de funcionamiento para el componente investigado. Ha de observarse que, en el presente documento, esta temperatura se usa para determinar la tasa de crecimiento de grieta.

La figura 18C muestra un mapa de ejemplo de la razón máxima de tensión y tenacidad a la fractura (s/K_{Ic}) durante un ciclo de funcionamiento para el componente investigado. Ha de observarse que en el presente documento los valores de tensión y tenacidad a la fractura asociados se usan para determinar un crecimiento de grieta estable (fallo de componente).

La figura 18D muestra un mapa de ejemplo de la etapa de carga (punto en el tiempo) en el que la razón de tensión y tenacidad a la fractura (s/K_{Ic}) durante un ciclo de funcionamiento para el componente investigado es máxima.

Aunque los mapas representados en la figura 18A-D están en escala de grises, debe observarse que en la práctica, tales mapas pueden generarse también en color, por ejemplo, 16 ó 32 bits. En una realización, tales mapas pueden presentarse visualmente al usuario mediante el dispositivo 83 de I/O en la figura 8.

Las figuras 19A-E muestran respectivamente ejemplos de la evolución en el tiempo en una ubicación del componente para las cantidades siguientes, concretamente, velocidad angular, temperatura, tensión, tenacidad a la fractura, tensión/tenacidad a la fractura. En cada una de estas figuras 19A-E, la línea 191 vertical indica la razón máxima de tensión y tenacidad a la fractura que define el punto en el tiempo crítico para un crecimiento de grieta inestable.

Haciendo de nuevo referencia a la figura 9, bloque 94, el tamaño de fisura inicial de la ubicación seleccionada se determina a partir de la distribución de TFS calculada en el bloque 91b.

En el bloque 95, el crecimiento de grieta en la ubicación seleccionada de la representación se calcula, por ejemplo, mediante análisis de LEFM o cualquiera de sus extensiones tales como FAD o IPZE.

- 5 El crecimiento por fatiga de una grieta de superficie semielíptica se ilustró en la figura 1. El crecimiento de grieta por fatiga de una grieta de superficie de pared pasante se ilustra en la figura 13. En ambos casos, el crecimiento de grieta puede calcularse integrando los dos semiejes a y c de manera independiente):

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, T, R) \quad \text{ecuación (5)}$$

$$\Delta K = \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi a} \cdot Y(a, t, W)$$

- 10 donde
- da: Diferencial de tamaño de grieta
- 15 dN: Diferencial de ciclo
- f($\Delta K, T, R$): Tasa de crecimiento de grieta
- 20 ΔK : Amplitud de intensidad de tensión cíclica
- T: Temperatura
- R: R-razón, tensión mínima/tensión máxima
- 25 $\Delta\sigma$: Amplitud de tensión cíclica
- a, t, W: tamaño de grieta, grosor de placa y anchura
- Y(a, t, W): factor de geometría que describe la geometría de grieta
- 30 En la siguiente descripción, la dependencia de T y R ya no se tiene en cuenta ya que las expresiones no dependen explícitamente de T y R . Una solución aproximada (discretizada por $n=0, 1, 2, \dots, s$, s =número de etapas de integración) de la ecuación diferencial ordinaria (ODE) [7] puede lograrse introduciendo un tamaño de etapa discreto ΔN que produce un aumento finito para el tamaño de grieta a:

$$\begin{aligned} a_{n+1} &= a_n + \Delta a \\ \Delta a &= \Delta N \cdot f(\Delta K_n) \end{aligned} \quad \text{ecuación (6)}$$

- 40 La precisión de este esquema de integración de primer orden de Euler depende del tamaño de ΔN . Algoritmos de integración de orden más alto tales como esquemas de Runge-Kutta (RK) pueden usarse para aumentar la precisión de la solución que usa el mismo tamaño de etapa de integración ΔN .

- 45 Según la realización propuesta, se emplea un algoritmo de Runge-Kutta modificado (MRK) para calcular el crecimiento de grieta. En una evaluación de mecánica de fractura probabilística ha de realizarse un gran número de cálculos de crecimiento de grieta por fatiga (de millones a billones para un componente que tiene una PoF baja). La mayor parte de las grietas evaluadas no presentará fallo (es decir, el tamaño de grieta crítico no se alcanzará) dentro del número de ciclos dado. En vista de este entendimiento, se ha desarrollado un esquema de integración de Runge-Kutta modificado (MRK) que siempre sobrestima el crecimiento de grieta:

$$a_{n+1} = a_n + \frac{\Delta a_1}{6} + \frac{\Delta a_2}{3} + \frac{\Delta a_3}{3} + \frac{\Delta a_4}{6}$$

$$\Delta a_1 = \Delta N \cdot f(\Delta K_n)$$

$$\Delta a_2 = \Delta N \cdot f\left(\Delta K_n + \frac{1}{2} \frac{\Delta K_n}{2a_n} \Delta a_1\right)$$

$$\Delta a_3 = \Delta N \cdot f\left(\Delta K_n + \frac{1}{2} \frac{\Delta K_n}{2a_n} \Delta a_2\right)$$

$$\Delta a_4 = \Delta N \cdot f\left(\Delta K_n + \frac{\Delta K_n}{2a_n} \Delta a_3\right)$$

ecuación (7)

5 En la figura 14, el cálculo de crecimiento de grieta según el esquema MRK propuesto se ilustra y se compara con el esquema de Euler (ecuación (6)) y los algoritmos de Runge-Kutta de orden 2, 3 y 5 para una placa agrietada por el centro $a_0=1$ mm, $c=1e-12$, $m=3$, y $N=20000$ ciclos. En la figura 14, el eje Y representa el tamaño de grieta final, mientras que el eje X representa la etapa de integración ΔN (ciclos). Las curvas 141, 142, 143 y 144 representan respectivamente esquemas de integración RK1(Euler), RK2, RK3(Heun) y RK5, mientras que la curva 145 representa el esquema MRK de la realización propuesta. Tal como se ve, el esquema MRK propuesto siempre sobrestima el tamaño de grieta independientemente del tamaño de etapa de integración mostrado.

10 El esquema MRK propuesto permite una estimación conservadora del crecimiento de grieta en una (o unas pocas si se desea) etapa de integración. Si, después de esta estimación conservadora del crecimiento de grieta para el número total de ciclos, la grieta es todavía estable, no ha de evaluarse adicionalmente el crecimiento de grieta ya que el componente no presentará fallo debido a este caso. El tiempo de cálculo de estas grietas estables puede reducirse significativamente (normalmente, un factor de 1000).

15 Haciendo de nuevo referencia a la figura 9, basándose en el cálculo de crecimiento de grieta, se determina si la muestra o representación particular presenta fallo en un número dado de ciclos N. En una realización, se determina un fallo cuando el tamaño de grieta excede un tamaño de grieta crítico predeterminado. Si no se produce fallo, el control se mueve a la siguiente muestra mediante el bloque 98. Si se determina un fallo en el bloque 96, aumenta el contador del número de representaciones con fallo (bloque 97). De esta manera, se determina una suma total del número de muestras que presentaron fallo después de N ciclos.

25 El bucle termina cuando el crecimiento de grieta y fallo se ha determinado para toda condición de material, condición de tamaño de fisura y ubicaciones del componente posibles.

30 En el bloque 99, el módulo de computación calcula la probabilidad de fallo del componente después de N ciclos ya que $PoF(N) = Nf/S$, en el que $PoF(N)$ es la probabilidad de fallo del componente después de N ciclos, Nf es la suma total del número de representaciones que determina que han presentado fallo después de N ciclos, y S es el número total de representaciones.

35 En una realización, la función de probabilidad puede presentarse visualmente al usuario en forma de gráfico mediante el dispositivo 83 de I/O en la figura 8. La figura 15 muestra un ejemplo de tal curva 151 de probabilidad de fallo, determinada por el presente método, que puede usarse para predecir la probabilidad de fallo del componente después de cualquier número de ciclos N dado.

40 En una realización, se genera un mapa de fallos después de un número predeterminado de ciclos, indicando el mapa de fallos el número de representaciones con fallo en un área. La figura 20 es un ejemplo del mapa de fallos después de un número determinado de ciclos de funcionamiento para el componente investigado (en este caso, un modelo simétrico de eje en 2D de un disco de rotor de turbina de gas). El mapa de fallos muestra el número de muestras que presentan fallo en un área (normalizado por el número de muestras). Ha de observarse que la figura 23 se muestra en una escala logarítmica y muestra regiones críticas del componente. En una realización, un mapa de fallos de este tipo puede presentarse visualmente al usuario mediante el dispositivo 83 de I/O en la figura 8. Aunque el mapa representado en la figura 20 está en escala de grises, debe observarse que en la práctica, tales mapas pueden generarse también en color, por ejemplo, 16 ó 32 bits

45 La técnica ilustrada anteriormente puede usarse para hacer funcionar un componente con tensión cíclica planificando un intervalo de interrupción del funcionamiento o de mantenimiento del componente teniendo en cuenta una resistencia a grieta por fatiga probabilística del componente tal como se estimó anteriormente.

5 En una realización adicional, el módulo de computación puede calcular además una función de riesgo o riesgo por ciclo. La función de riesgo es aproximadamente la derivada de la función de probabilidad de fallo $PoF(N)$ y se define como: $H(N+1)=(PoF(N+1)-PoF(N))/(1-PoF(N))$, donde H es la función de riesgo o riesgo por ciclo, N es el número de ciclos, PoF es la probabilidad de fallo. La figura 16 muestra un ejemplo de curva 161 de función de riesgo, determinado por el presente método, que puede usarse para predecir el riesgo por inicio del componente para cualquier ciclo N .

10 Con respecto al sistema informático de la figura 8, en una realización, el sistema propuesto puede implementarse también en arquitecturas multinúcleo modernas donde cada núcleo tiene su propia memoria y conjunto de datos. El denominado núcleo principal (o nodo) distribuye las S muestras a todos los nodos de manera que cada uno de los Q núcleos (o nodos) calcula sólo S/Q muestras (ya que los cálculos individuales son independientes). Después de que cada núcleo realice el cálculo, la información de cada núcleo se reúne en el denominado núcleo principal y se analiza adicionalmente con normalidad. Una posibilidad es el uso de la interfaz de paso de mensajes, que se instala habitualmente en arquitectura de ordenador de alto rendimiento y se enlaza fácilmente a códigos C, C++, y FORTRAN. Con este enfoque, se logra un ahorro de rendimiento adicional en un factor de casi Q . Este ahorro puede ser significativo ya que los agrupamientos modernos tienen fácilmente miles de núcleos. Por ejemplo, un cálculo a modo de ejemplo realizado en 7,5 días (=10,800 min) en un único núcleo de un procesador AMD Opteron Quad-Core 2380 puede ejecutarse en aproximadamente 11 minutos cuando se utilizan 1000 núcleos de la misma arquitectura de núcleo.

25 Aunque se han descrito en detalle realizaciones específicas, los expertos medios en la técnica apreciarán que pueden desarrollarse diversas modificaciones y alternativas para esos detalles a la luz de las enseñanzas globales de la divulgación. Por ejemplo, pueden combinarse los elementos descritos en asociación con diferentes realizaciones. Por consiguiente, se pretende que las disposiciones particulares dadas a conocer sean solamente ilustrativas y no deben construirse como limitativas del alcance de las reivindicaciones o la divulgación, a la que va a darse toda la amplitud de las reivindicaciones adjuntas, y cualquiera y todos los equivalentes de las mismas. Debe observarse que el término “que comprende” no excluye otros elementos o etapas y el uso de los artículos “un” o “una” no excluyen una pluralidad.

30

REIVINDICACIONES

1. Método (90) implementado por ordenador para la estimación probabilística de resistencia a grieta por fatiga de un componente de turbina de gas configurado para someterse a tensión cíclica, comprendiendo el método (90):
- definir una pluralidad de representaciones del componente a partir de datos (90a-g) de dispersión de propiedad de material y datos (90h-j) de dispersión de tamaño de fisura del componente, en el que cada representación está definida por una condición de material y una condición de tamaño de fisura posibles asociadas con el componente,
 - para cada representación individual, seleccionar (93) una ubicación de componente y determinar (96) si dicha representación individual presenta fallo después de un número dado de ciclos N, basándose en una determinación (95) de un crecimiento de grieta en la ubicación seleccionada, determinándose (95) el crecimiento de grieta basándose en la condición de material y la condición de tamaño de fisura en la ubicación seleccionada, en el que se determina (96) un fallo de la representación individual si se determina que el crecimiento de grieta es inestable,
 - determinar (97) una suma total del número de las representaciones que presentaron fallo después de N ciclos, y
 - determinar (99) una probabilidad de fallo del componente después de N ciclos, como $PoF(N) = Nf/S$,
- en el que:
- PoF(N) es la probabilidad de fallo del componente después de N ciclos,
- Nf es la suma total del número de representaciones que se determina que han presentado fallo después de N ciclos, y
- S es el número total de representaciones; y
- en el que el método se realiza mediante una metodología de Monte-Carlo, suponiendo que cada representación individual tiene la misma probabilidad de aparición (colectividad microcanónica) y que la distribución de posición de fisura es constante.
2. Método (90) según la reivindicación 1, que comprende además generar un mapa de fallos después de un número predeterminado de ciclos, indicando el mapa de fallos el número de representaciones con fallo en un área.
3. Método (90) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que cada condición de material se define representando valores a partir de datos (90a-g) de dispersión de propiedades de material del componente que incluyen al menos tenacidad (90d) a la fractura K_{1c} y tasa (90a) de crecimiento de grieta da/dN .
4. Método (90) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que cada determinación (95) de crecimiento de grieta individual se lleva a cabo mediante una simulación basándose en la mecánica de fractura elástica lineal.
5. Método según la reivindicación 3, en el que las propiedades de material incluyen además resistencia (90g) al estiramiento RP02 y/o resistencia (90f) al estiramiento a la rotura RM y/o módulo (90e) de Young E.
6. Método (90) según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, que comprende además generar (91a) un mapa de estado transitorio crítico del componente basándose en la condición de material del componente, en el que el mapa de estado transitorio crítico representa una distribución de tensión y temperatura del componente en el que a cada ubicación de componente se le asigna un valor de tensión crítico y un valor de temperatura crítico.
7. Método (90) según la reivindicación 6, en el que el mapa de estado transitorio crítico se genera (91a) mediante un análisis de elementos finitos transitorio.
8. Método (90) según cualquiera de las reivindicaciones 6 y 7, en el que a cada representación individual se le asigna una distribución de tensión y/o temperatura ligeramente diferentes.
9. Método (90) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el crecimiento de grieta se determina (95) mediante una integración numérica de una tasa de crecimiento de grieta da/dN ,

donde 'da' designa un aumento de tamaño de grieta y 'dN' designa un aumento de ciclo,

en el que la integración se lleva a cabo usando un esquema de integración Runge-Kutta modificado que siempre sobreestima el crecimiento de grieta independientemente del tamaño de etapa de integración.

10. Método (90) según la reivindicación 9, en el que los datos (91b) de distribución de tamaño de fisura verdadero se determinan como:

$$\{TFS\} = PoD_{MC} [\{KSR\} \otimes \{k\}]$$

donde

{TFS} designa datos de distribución de tamaño de fisura verdadero,

{KSR} designa datos de distribución de tamaño de fisura indicados mediante examen no destructivo,

{k} designa datos de distribución de factor de conversión,

\otimes designa una operación de multiplicación de Kronecker, y PoDMC[conjunto de datos] es una operación de Monte-Carlo que intercambia datos de cero o datos de valor pequeño en [conjunto de datos] con datos distintos a cero que representan fisuras no detectadas tal como se describe por la probabilidad de detección de la técnica de examen no destructivo.

11. Método (90) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además determinar una función de riesgo o riesgo por ciclo, como

$$H(N+1) = (PoF(N+1) - PoF(N)) / (1 - PoF(N)),$$

donde

H es la función de riesgo o riesgo por ciclo,

N es el número de ciclos,

PoF es la probabilidad de fallo.

12. Método para hacer funcionar un componente con tensión cíclica, comprendiendo dicho método planificar un intervalo de interrupción del funcionamiento o de mantenimiento de dicho componente teniendo en cuenta una resistencia a grieta por fatiga probabilística del componente tal como se estima mediante un método (90) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

13. Sistema (80) para la estimación probabilística de resistencia a grieta por fatiga de un componente configurado para someterse a tensión cíclica, comprendiendo el sistema:

- una memoria (81) para almacenar datos (90a-g) de dispersión de propiedad de material y datos (90h-j) de dispersión de tamaño de fisura, y
- medios (82) de procesamiento, que comprenden:
 - un módulo (87) de biblioteca que comprende una pluralidad de bibliotecas para manejar la gestión de memoria, en el que al usar dichas bibliotecas, se define una pluralidad de representaciones del componente, en el que cada representación se define por una condición de material y una condición de tamaño de fisura posibles asociadas con el componente,
 - un módulo (84) de mecánica de fractura para determinar si una representación individual presenta fallo después de un número dado de ciclos N, basándose en la determinación de un crecimiento de grieta en una ubicación seleccionada en dicha representación, determinándose el crecimiento de grieta basándose en la condición de material y la condición de tamaño de fisura en la ubicación seleccionada, en el que se determina un fallo de la representación individual si se determina que el crecimiento de grieta es inestable, en el que el módulo de mecánica de fractura está configurado para llevar a cabo dicha determinación de fallo para cada una de la pluralidad de representaciones, y

- un módulo (85) de computación para determinar una probabilidad de fallo del componente después de N ciclos, como $PoF(N) = Nf/S$,

en el que:

- 5
- PoF(N) es la probabilidad de fallo del componente después de N ciclos,
- Nf es una suma total del número de representaciones que se determina que han presentado fallo después de N ciclos por el módulo de mecánica de fractura, y
- 10
- S es el número total de representaciones;
- en el que se aplica una metodología de Monte-Carlo, suponiendo que cada representación individual tiene la misma probabilidad de aparición (colectividad microcanónica) y que la distribución de posición de fisura es constante.
- 15
14. Sistema (80) según la reivindicación 13, que comprende además un módulo (88) de análisis de elementos finitos para generar un mapa de estado transitorio crítico del componente basándose en la condición de material del componente, en el que el mapa de estado transitorio crítico representa una distribución de tensión y temperatura del componente en el que a cada ubicación de componente se le asigna un valor de tensión crítico y un valor de temperatura crítico.
- 20

FIG 1

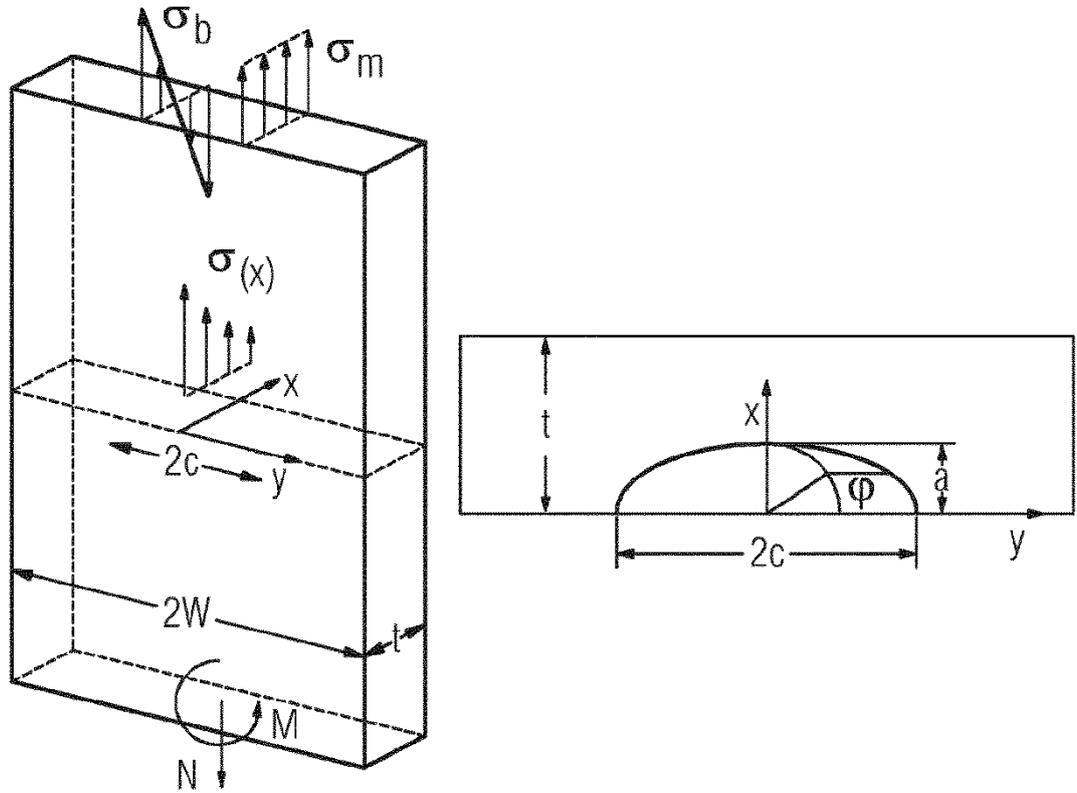


FIG 2

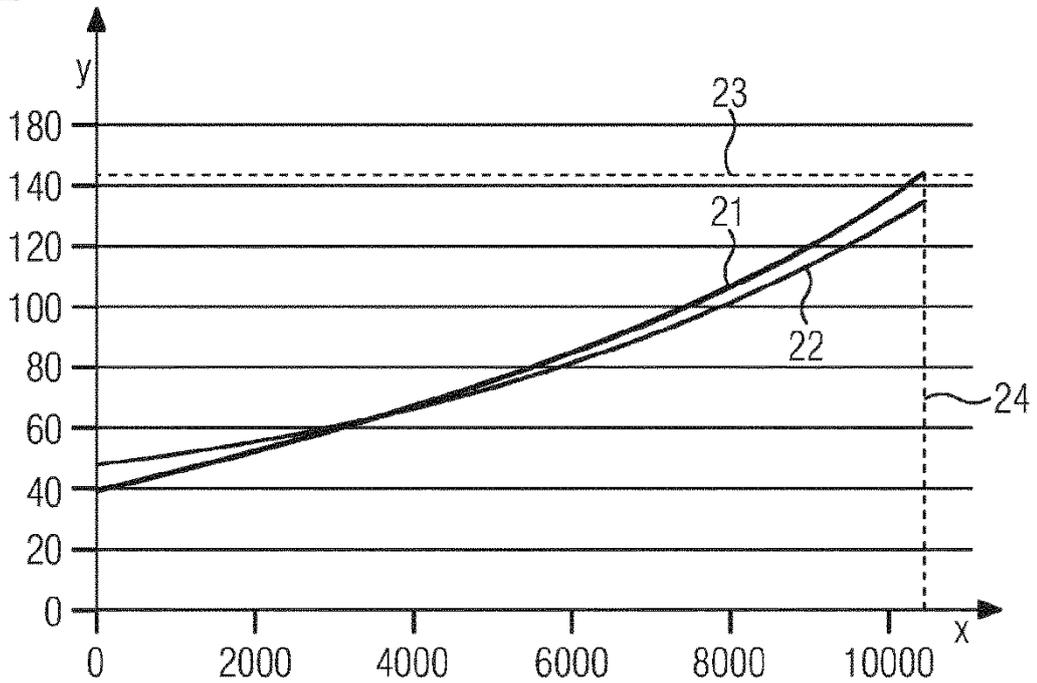


FIG 3

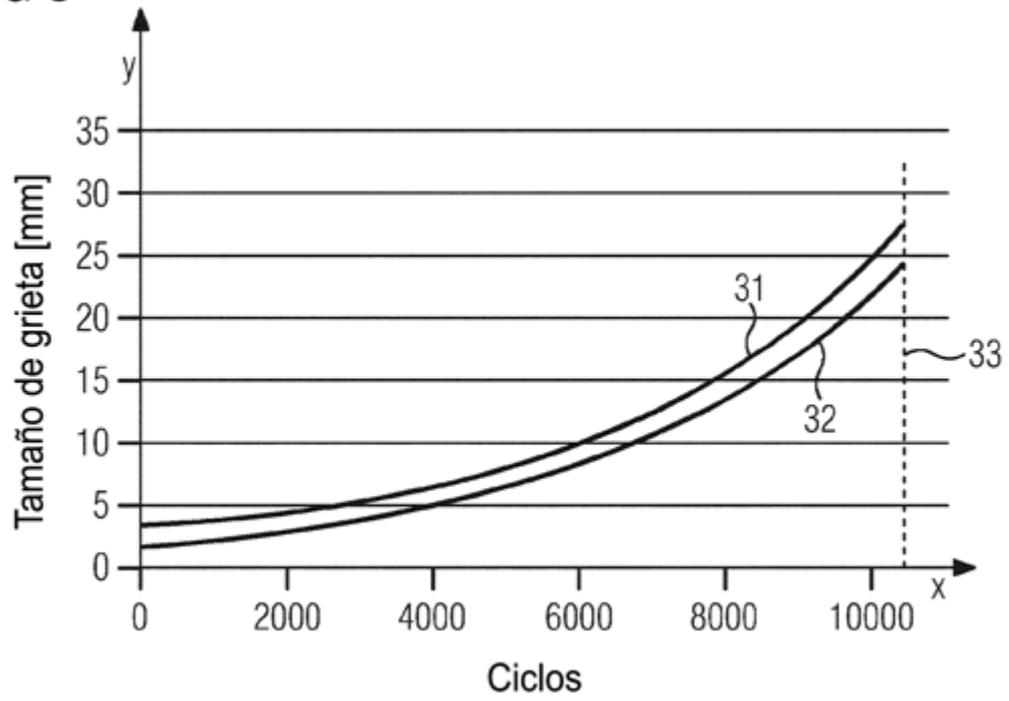


FIG 4

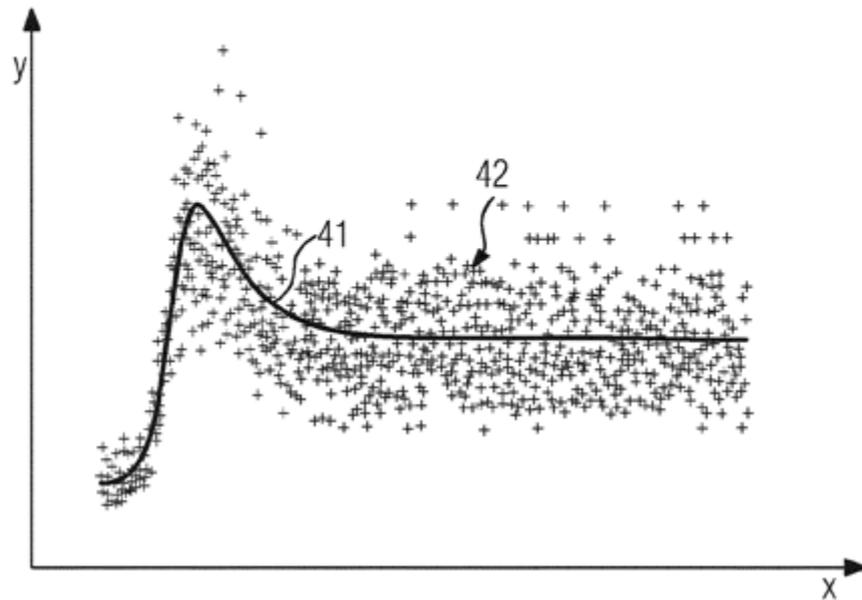


FIG 5

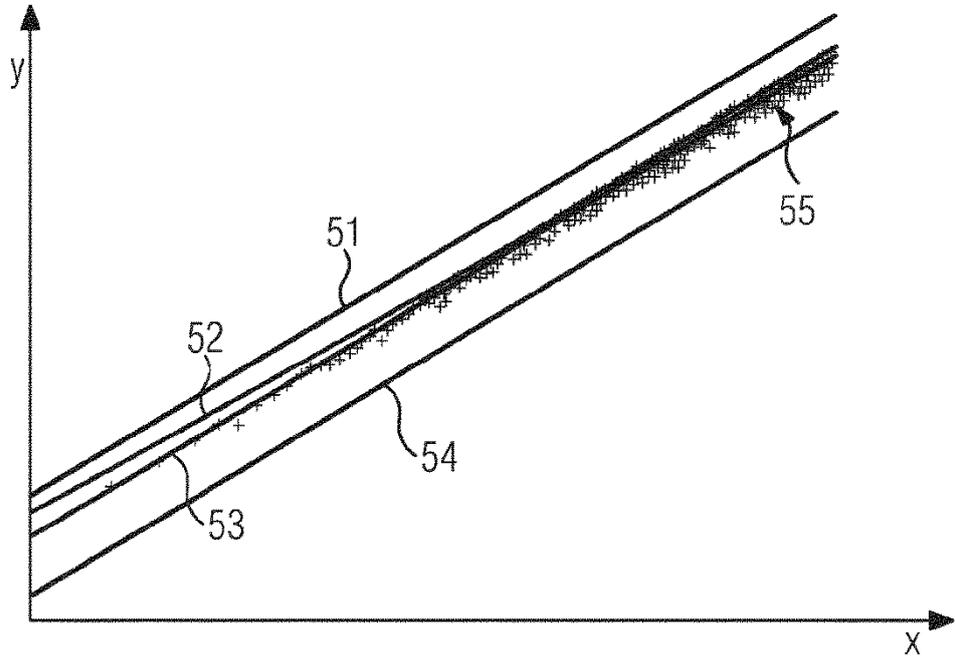


FIG 6

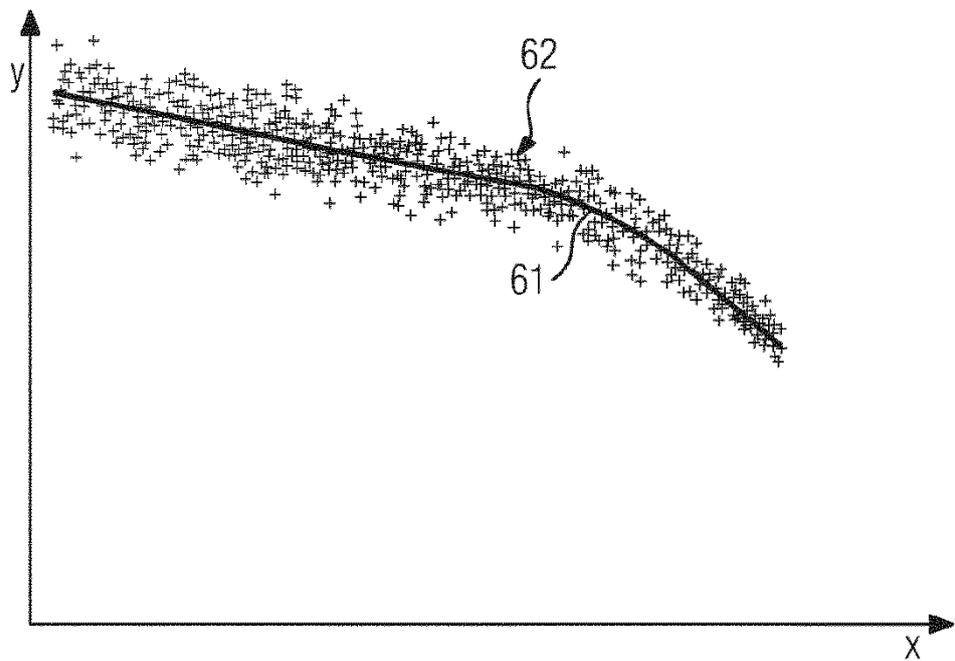


FIG 7

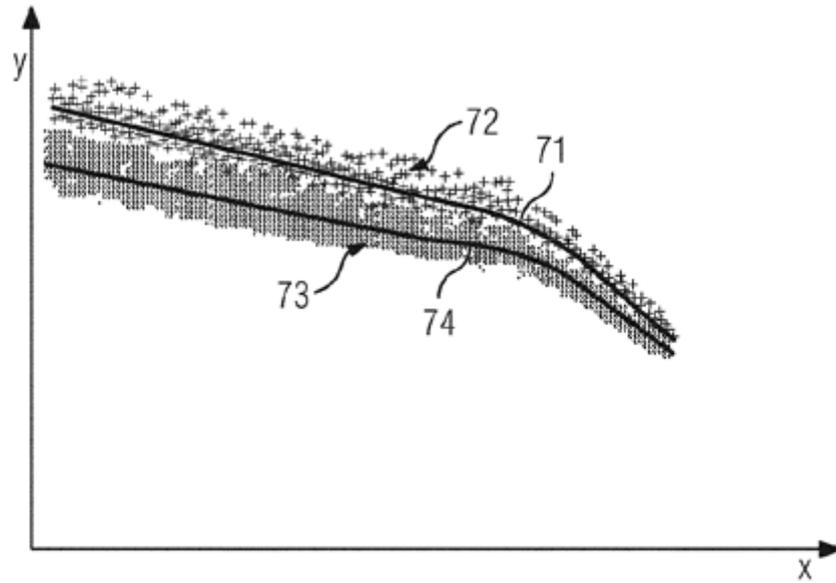


FIG 8

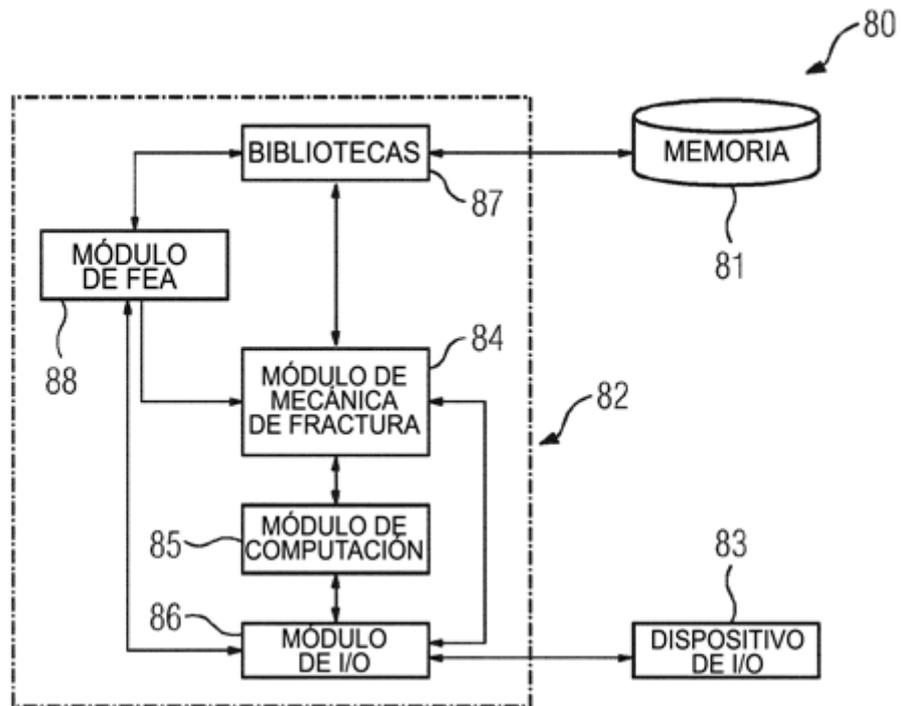


FIG 9

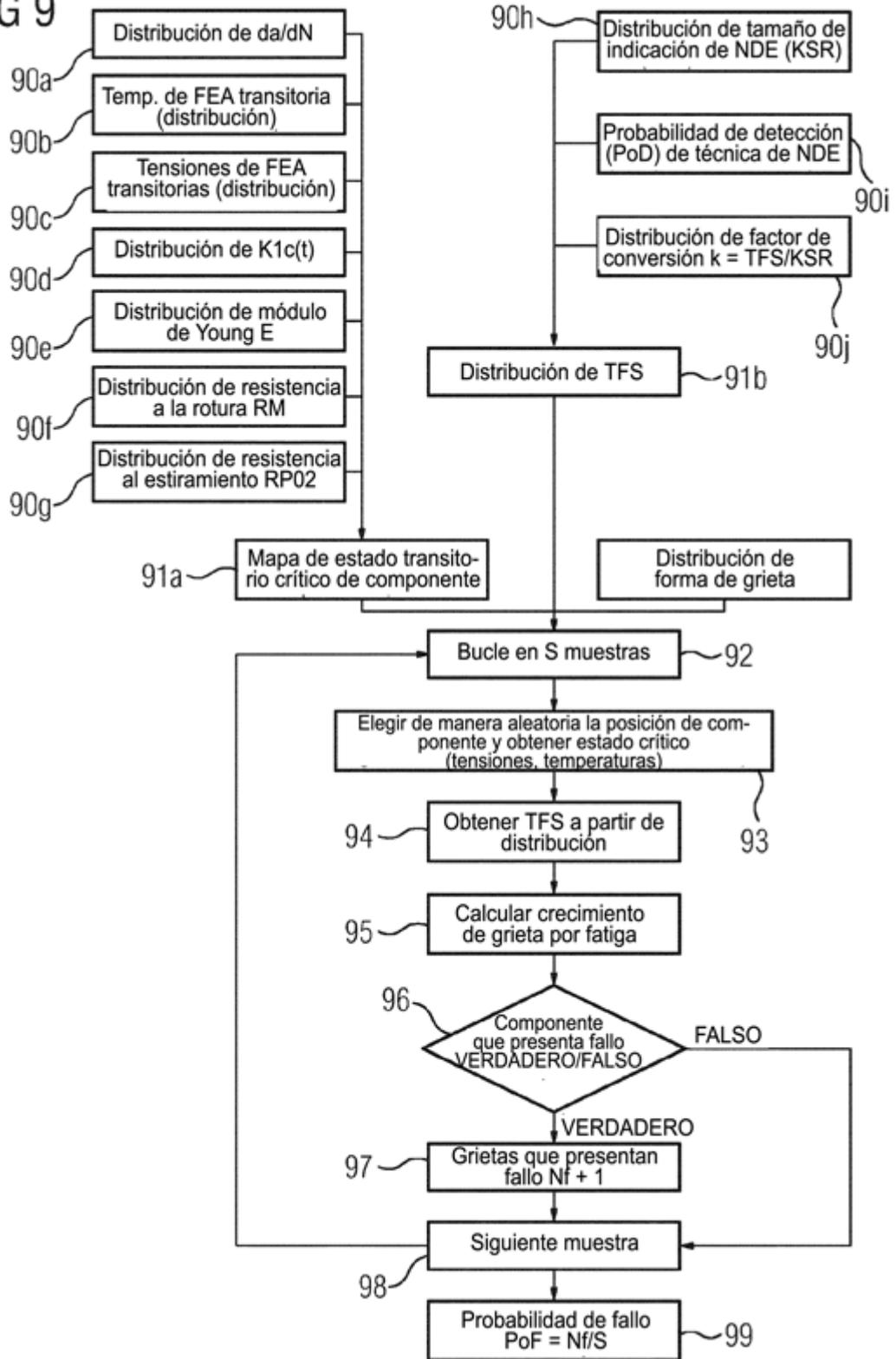


FIG 10

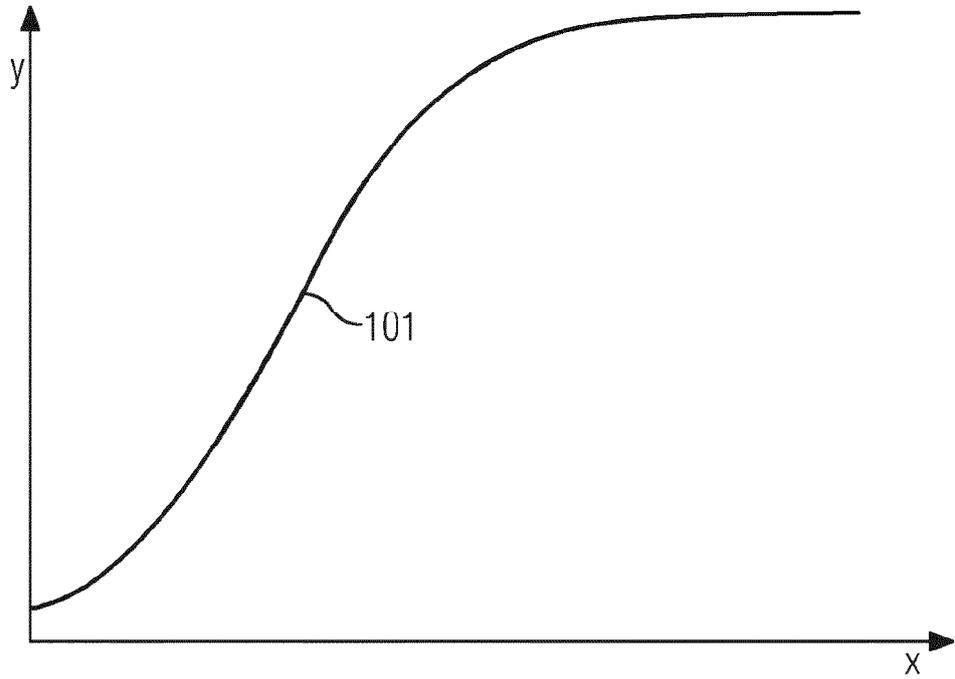


FIG 11

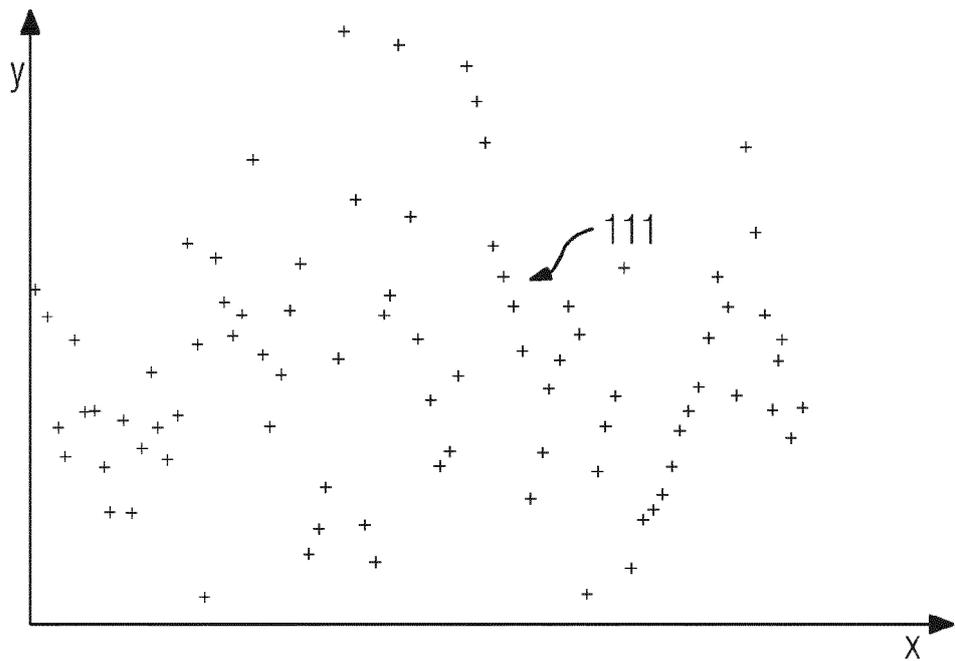


FIG 12

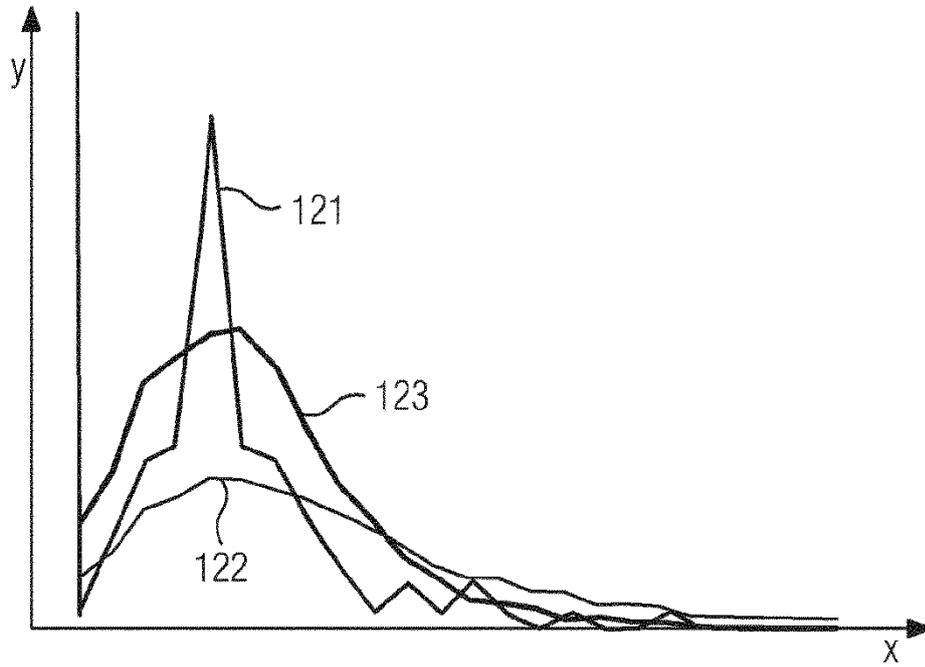


FIG 13

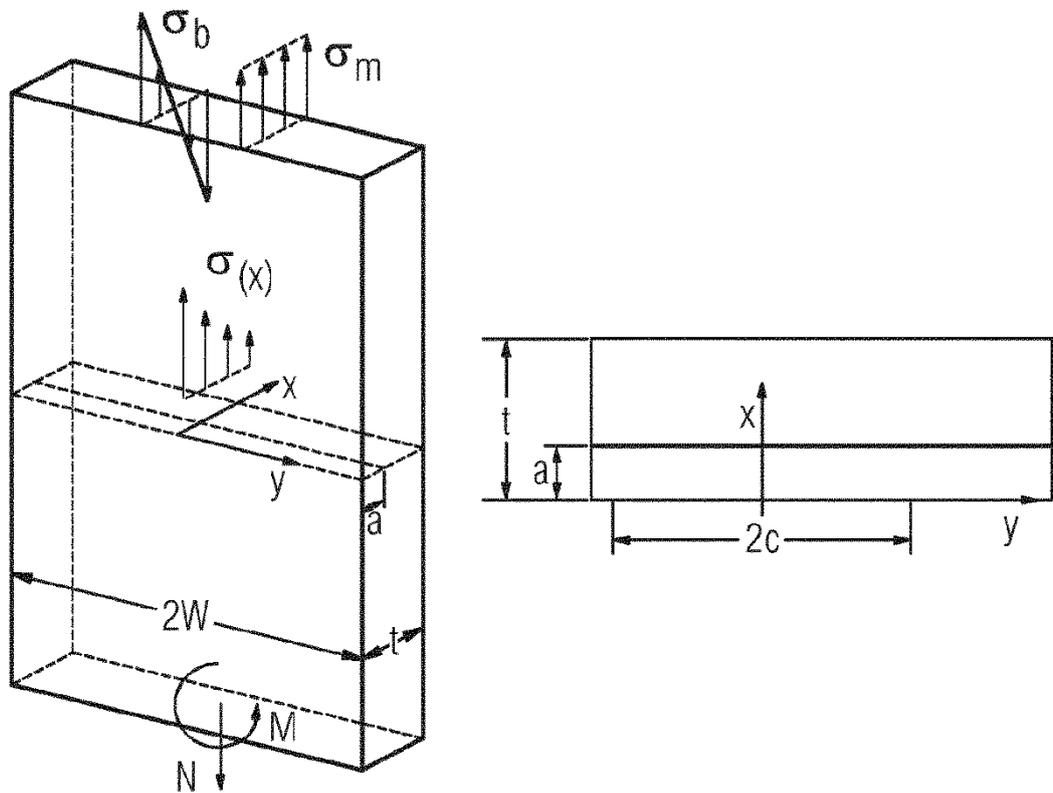


FIG 14

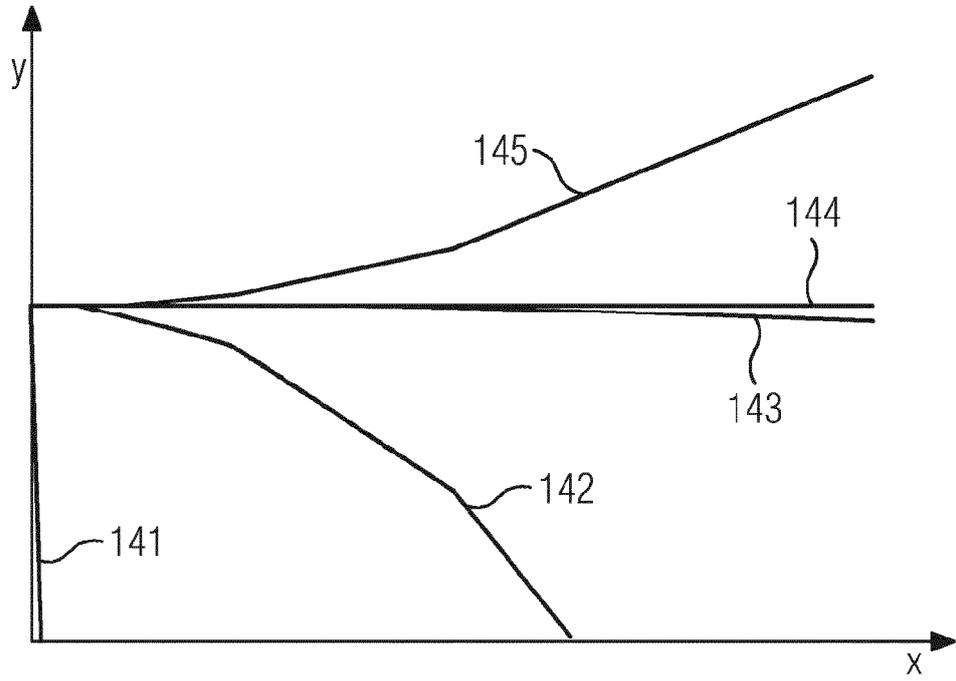


FIG 15

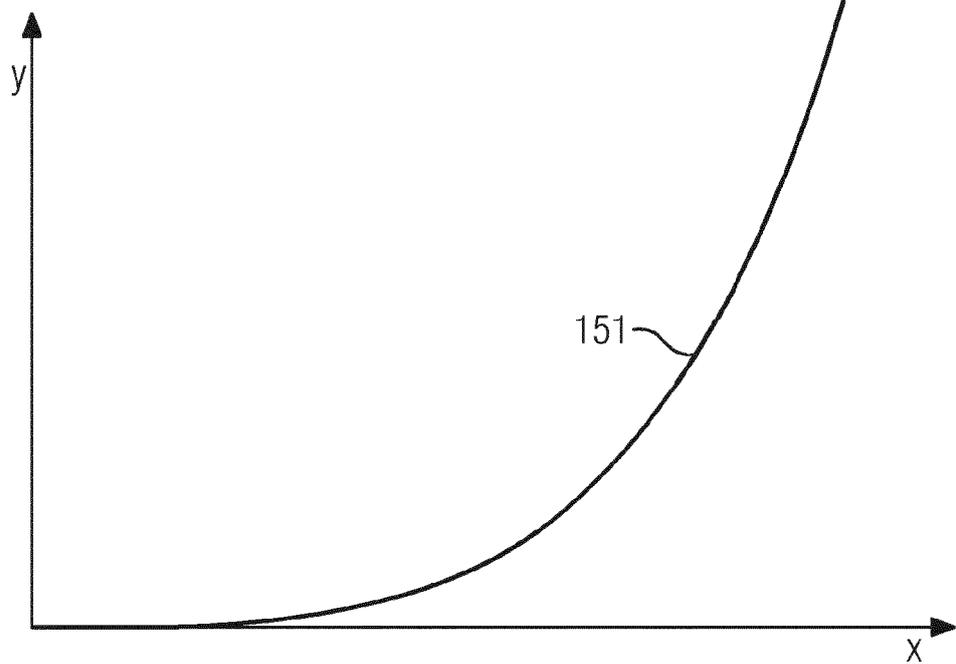


FIG 16

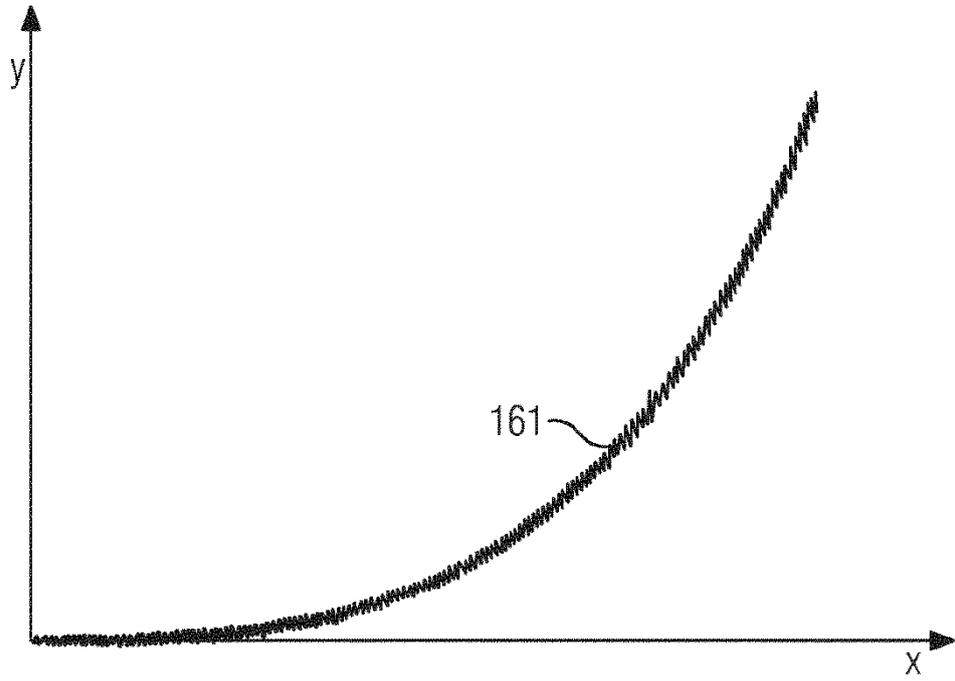


FIG 17

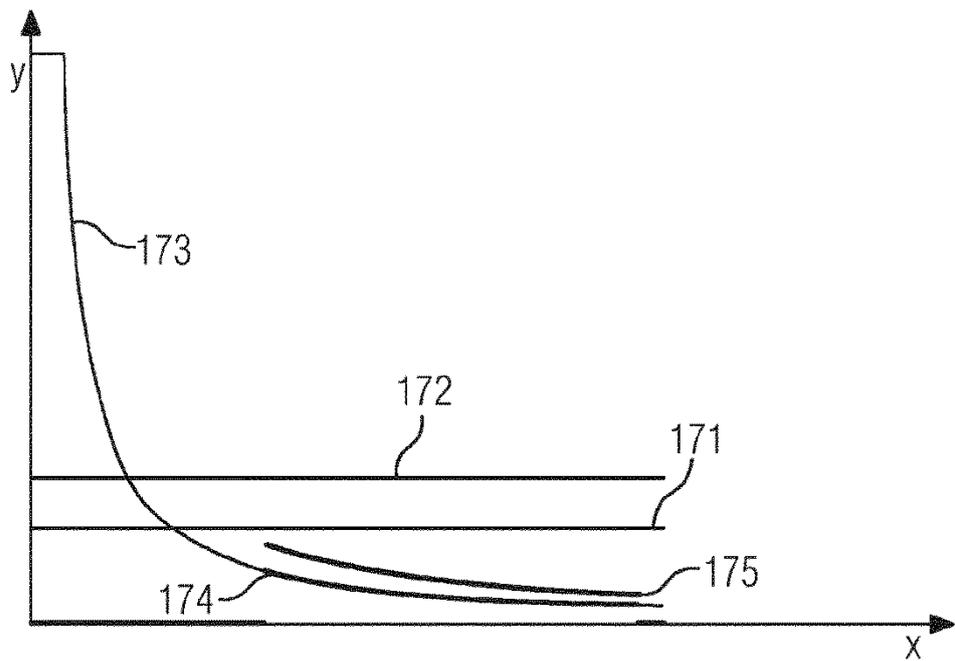


FIG 18A

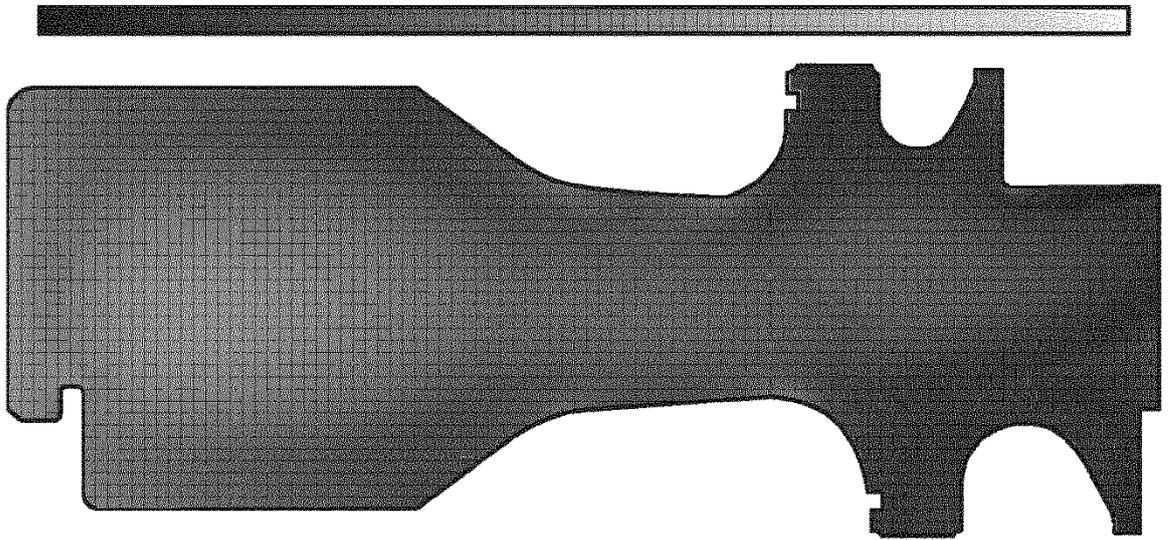


FIG 18B

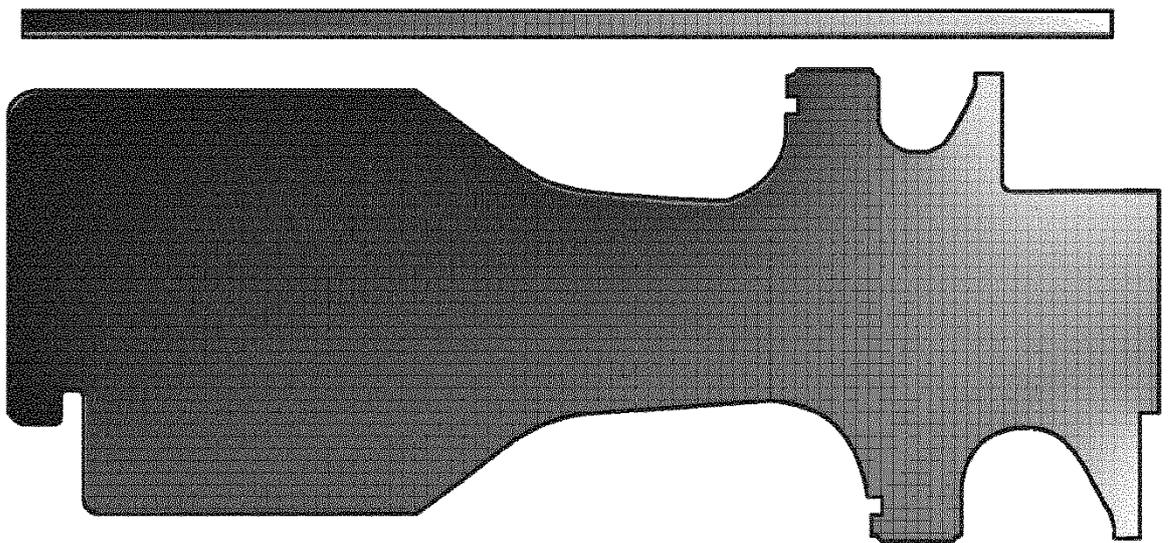


FIG 18C

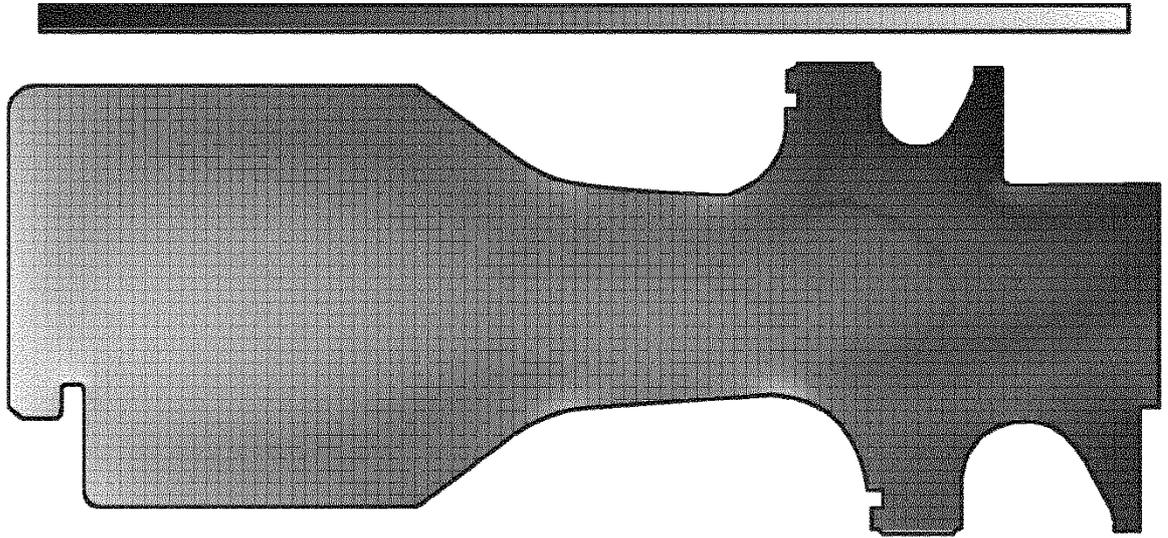


FIG 18D

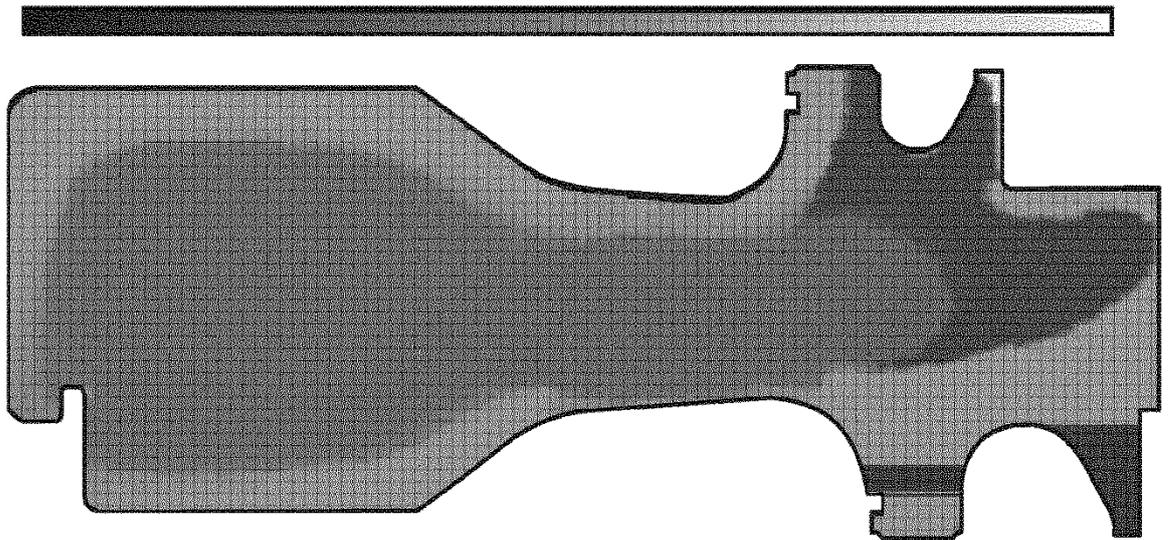


FIG 19A

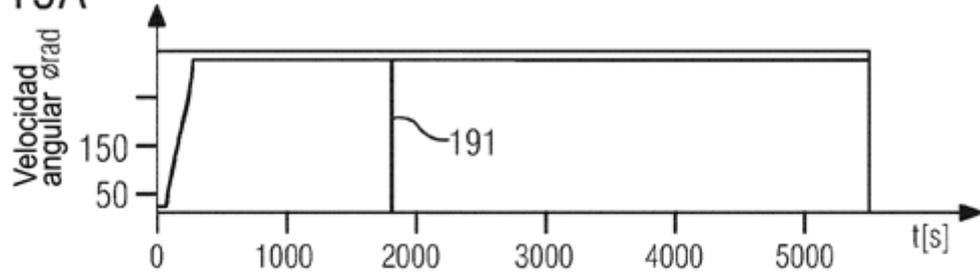


FIG 19B

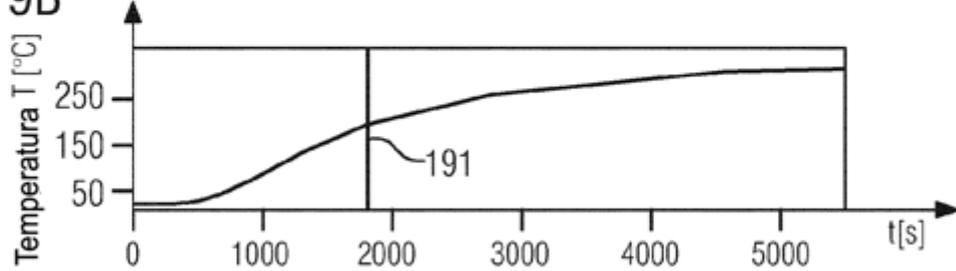


FIG 19C

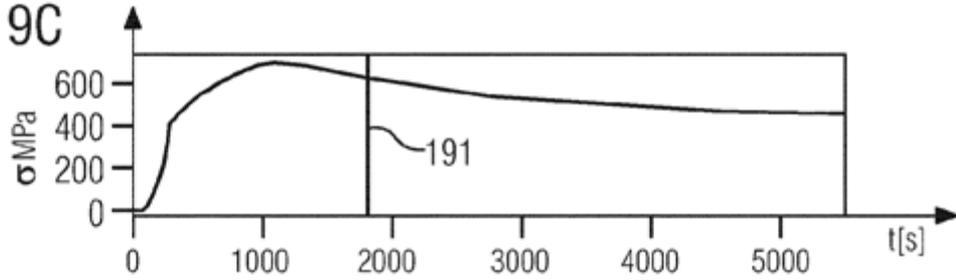


FIG 19D

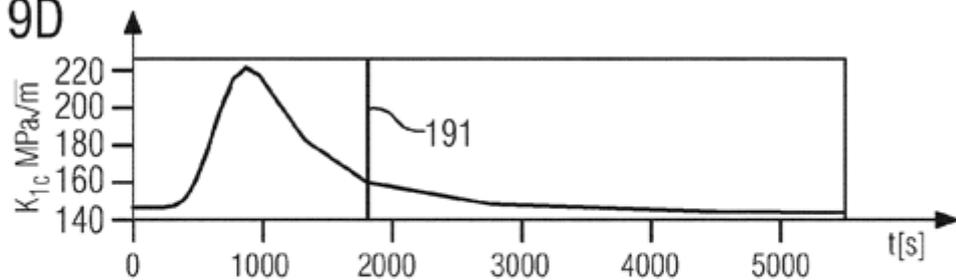


FIG 19E

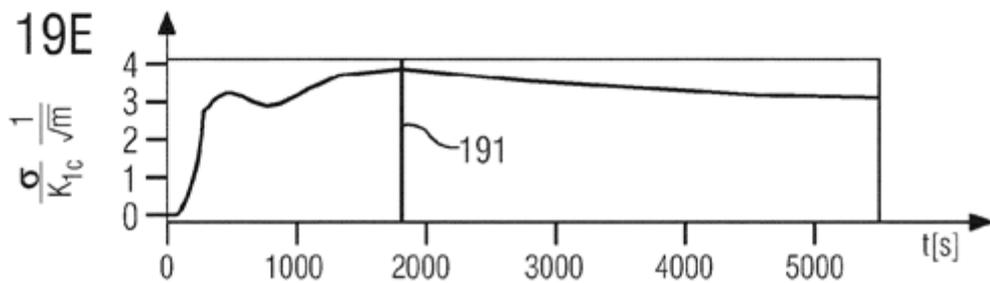


FIG 20

