

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 953 887**

51 Int. Cl.:

G01N 25/72 (2006.01)

G01N 21/88 (2006.01)

G06T 7/00 (2007.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.04.2010** **E 10003756 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **07.06.2023** **EP 2375243**

54 Título: **Método de prueba termográfica y dispositivo de prueba para llevar a cabo el método de prueba**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
16.11.2023

73 Titular/es:

**INSTITUT DR. FOERSTER GMBH & CO. KG
(100.0%)
In Laisen 70
72766 Reutlingen, DE**

72 Inventor/es:

**TRAXLER, GERHARD y
PALFINGER, WERNER**

74 Agente/Representante:

TOMAS GIL, Tesifonte Enrique

ES 2 953 887 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Método de prueba termográfica y dispositivo de prueba para llevar a cabo el método de prueba

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

[0001] La invención se refiere a un método de prueba termográfica para la detección e identificación con resolución espacial de defectos cercanos a la superficie en un objeto de prueba y a un dispositivo de prueba adecuado para llevar a cabo el método de prueba.

[0002] Los productos semiacabados de material eléctricamente conductor, como, por ejemplo, palanquillas, barras, varillas, tubos o alambres de materiales metálicos, pueden servir como materia prima para productos finales de alta calidad y, a menudo, están sujetos a los más altos requisitos de calidad. La prueba de defectos en los materiales, en particular defectos cercanos a la superficie, como grietas, huecos u otras faltas de heterogeneidad, es una parte importante del control de calidad de estos productos. En este caso, en general, el objetivo es probar la superficie del material de la manera más completa posible con una alta resolución local, que, si es posible, se lleva a cabo lo antes posible en la cadena de producción para decidir, basándose en los resultados de la prueba, dependiendo del tipo de defectos encontrados, si los defectos no son críticos para el procesamiento posterior o al menos reparables mediante un procesamiento posterior, como pulido, o si el material debe desecharse.

[0003] Además de los métodos magnéticos utilizados a menudo para dichas pruebas, como la tecnología de corrientes parásitas o la tecnología de flujo de fuga, ahora también se utilizan métodos de prueba termográfica para la detección e identificación con resolución espacial de defectos cercanos a la superficie en objetos de prueba.

[0004] En un método de prueba termográfica conocido, después del laminado, un objeto de prueba eléctricamente conductor, por ejemplo, una palanquilla de acero, pasa a través de una bobina de inducción alimentada con corriente alterna de alta frecuencia, que induce un flujo de corriente cerca de la superficie de muestra de prueba. Debido al efecto piel, que depende de la frecuencia de excitación, la densidad de corriente cerca de la superficie del objeto de prueba es mayor que dentro del objeto de prueba. Las interferencias estructurales, como, por ejemplo, las grietas, que se encuentran en la sección transversal del flujo de corriente eléctrica inducida, actúan como resistencias eléctricas y redirigen el flujo de corriente, que busca el camino de menor resistencia (eléctrica) en el material de muestra de prueba. El resultado son mayores densidades de corriente y, por tanto, mayores pérdidas de potencia en los "puntos estrechos" del flujo de corriente en la zona de los defectos. La pérdida de potencia producida en la zona de las interferencias estructurales se hace evidente mediante la generación de calor, de tal manera que la zona afectada localmente limitada inmediatamente al lado de una interferencia estructural adquiere una temperatura más alta en comparación con el entorno libre de interferencias. Con la ayuda de una cámara térmica u otro dispositivo de captura adecuado sensible a la radiación térmica, ahora se puede detectar la presencia de defectos cercanos a la superficie con resolución espacial basada en los valores de temperatura locales dentro de una zona de superficie capturada por el dispositivo de captura. Por regla general, también se visualizan las zonas de superficie detectadas y las anomalías determinadas termográficamente se pueden evaluar automáticamente mediante un sistema de evaluación posterior.

[0005] La DE 10 2007 055 210 A1 describe un método de prueba termográfica y un dispositivo de prueba configurado para llevar a cabo el método de prueba. El dispositivo de prueba tiene una bobina de inducción para calentar una zona de superficie de un objeto de prueba metálico que pasa a través de la bobina de inducción, por ejemplo, una palanquilla de acero, y una o más cámaras infrarrojas para medir el perfil de temperatura de la palanquilla de acero que pasa a través de ella. Los resultados de la medición se utilizan para controlar un sistema de marcado de colores para marcar los defectos identificados. Según la descripción, para evaluar las imágenes termográficas (imágenes térmicas) capturadas por las cámaras infrarrojas está previsto un *software* de evaluación que analiza una o varias imágenes térmicas, identifica diferencias de temperatura por encima de un valor umbral predeterminado y las comunica como defecto. El tamaño de la diferencia de temperatura por encima del valor umbral especificado se considera una indicación de la profundidad del defecto. El *software* de evaluación puede evaluar los defectos tanto en términos de su longitud como en términos de la magnitud de la diferencia de temperatura por encima del valor umbral. El *software* de evaluación puede eliminar, de una lista de defectos, los defectos con una longitud inferior a una longitud mínima de defecto, de modo que dichos defectos no se evalúen como defectos. Sin embargo, si un defecto está por debajo de una longitud mínima de defecto, pero la magnitud de la diferencia de temperatura está por encima del valor umbral, que está por encima de un tamaño máximo de la diferencia de temperatura, dicho defecto aun se comunica como defecto. De este modo, se identifica un defecto en función de la longitud del defecto y de la diferencia de temperatura con respecto al entorno.

[0006] Normalmente, un aumento en el perfil de temperatura de más de 2 K en comparación con el entorno se considera un defecto, pero también se puede elegir que la temperatura umbral sea más baja. Una diferencia de temperatura con respecto al entorno de 5 K o más se identifica claramente como un defecto.

[0007] En la práctica, a un perfil de temperatura que se va a evaluar se le suele superponer una señal de interferencia con una amplitud significativa. Las fuentes de interferencia incluyen, entre otras cosas, fluctuaciones de emisividad local de la superficie del objeto de prueba, reflejos del entorno y circunstancias generales que no se pueden evitar en operaciones de prueba reales, como cuerpos extraños en la superficie del objeto de prueba. Los anuncios falsos también pueden deberse a la geometría del objeto de prueba, ya que, por ejemplo, los bordes de perfiles cuadrados a menudo muestran una temperatura más alta que el entorno. Normalmente, las diferencias de temperatura que se producen en un defecto similar a una grieta en comparación con la superficie circundante son del orden de 1 K a 10 K. Se ha observado que las amplitudes de interferencia pueden ser fácilmente de este orden de magnitud. Por lo tanto, a pesar de las posibles medidas para reducir la amplitud de las interferencias, no se puede descartar que las interferencias se clasifiquen erróneamente como errores estructurales o defectos.

[0008] El artículo especializado "An experimental investigation of defect sizing by transient thermography" de A.R. Hamazah *et al.* en: Insight, Vol 38 N° 3, marzo de 1996, páginas 167 a 173, describe un método de "Transient Thermography" ("termografía transitoria"). El principio de esta tecnología se basa en calentar primero la superficie de manera uniforme mediante una lámpara de destellos y luego observar el flujo de calor hacia el objeto de prueba, es decir, el flujo de calor vertical perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo. Este flujo de calor se ve obstaculizado por defectos del subsuelo, de modo que la zona defectuosa se enfría menos rápidamente que la zona circundante. Para determinar el diámetro del defecto se utiliza la evolución temporal de la mitad del ancho del perfil de temperatura en la zona de un defecto. También se observa la evolución temporal del contraste térmico en el lugar del defecto. Primero aumenta lentamente después del calentamiento, antes de volver a disminuir gradualmente después de superar un valor máximo en un momento determinado después del calentamiento.

[0009] El artículo especializado "Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites" de N.P. Avdelidis *et al.* en: NDT&E Internacional 36 (2003), páginas 433 a 439, también trata de la "termografía transitoria".

[0010] La US 2006/0262971 A1 muestra un método en el que se capturan fotografías térmicas de una zona de superficie. Las intensidades de los píxeles se determinan a partir de las imágenes.

[0011] En el método conocido por la US 2006/0114965 A1 se registran secuencias de imágenes termográficas. Estas se analizan juntas. El objeto de prueba se puede calentar mediante microondas, radiación láser o inducción.

[0012] En el método conocido por la WO 2009/065847 A1, ciertas zonas de superficie se calientan primero de manera controlada mediante una fuente de calor que se mueve a lo largo de la superficie. Después de un tiempo predeterminado se realiza una medición de temperatura para determinar el comportamiento de enfriamiento.

OBJETO Y SOLUCIÓN

[0013] Un objeto de la invención es proporcionar un método de prueba termográfica y un dispositivo de prueba termográfica adecuado para llevar a cabo el método, que ofrezcan una supresión de interferencias mejorada al evaluar señales termográficas en comparación con el estado de la técnica. En particular, debe mejorarse la selectividad a la hora de distinguir entre defectos reales y pseudodefectos atribuibles a otras interferencias. Preferiblemente, se debería proporcionar una prueba superficial completa de objetos alargados hechos de material eléctricamente conductor con mayor confiabilidad en la detección e identificación de defectos.

[0014] Para resolver estos y otros objetos, la invención proporciona un método de prueba termográfica con las características de la reivindicación 1, así como un dispositivo de prueba termográfica configurado para llevar a cabo el método con las características de la reivindicación 8. Las configuraciones adicionales ventajosas se indican en las reivindicaciones dependientes. La formulación de todas las reivindicaciones se incorpora por referencia al contenido de la descripción.

[0015] En el método de prueba, una sección del objeto de prueba que se va a probar se expone al efecto de un dispositivo de calentamiento. A esto también lo denominamos en lo sucesivo "calentar". En este caso, la energía calorífica se introduce de tal manera que se produce un desequilibrio térmico entre las zonas defectuosas o los lugares de fallo que presentan defectos y el material de muestra de prueba libre de defectos. Un lugar de fallo o una zona defectuosa incluye el fallo real, por ejemplo, una grieta, y el entorno inmediatamente adyacente. El entorno libre de defectos puede conservar su temperatura eventualmente bajo la influencia del dispositivo de calentamiento, es decir, no puede calentarse o puede calentarse en menor medida que los lugares de fallo.

[0016] Para objetos de prueba eléctricamente conductores, como, por ejemplo, palanquillas, barras, alambres o similares, se puede utilizar un método inductivo para calentar. La introducción de energía térmica en las zonas defectuosas del objeto de control también se puede reducir con la ayuda de ultrasonidos.

[0017] Dentro de una fase de propagación de calor se detecta una secuencia de dos o más imágenes termográficas, donde estas imágenes se capturan espaciadas en el tiempo. La fase de propagación de calor comienza cuando se nota el flujo de calor desde la zona defectuosa calentada localmente hacia el entorno. La fase de propagación de calor se prolonga después del calentamiento hasta la fase de enfriamiento y, en muchos casos, corresponde a la fase de enfriamiento. Sin embargo, a menudo no existe un límite estricto entre la fase de calentamiento y la fase de enfriamiento. El principio de la fase de propagación de calor aun puede coincidir con la fase de calentamiento local, ya que durante el proceso de calentamiento ya se puede propagar energía térmica.

[0018] Cada una de las imágenes termográficas representa en este caso una distribución de temperatura local en una zona de superficie del objeto de prueba capturada por la imagen termográfica en diferentes momentos durante la propagación de calor. Si el dispositivo de captura previsto para capturar imágenes termográficas, por ejemplo, una cámara termográfica, y el objeto de prueba están en reposo, entonces las zonas de superficie del objeto de prueba capturadas en diferentes momentos pueden ser idénticas. En caso de un movimiento relativo entre el objeto de prueba y el dispositivo de captura, las superficies pueden estar desplazadas espacialmente entre sí.

[0019] A partir de las imágenes termográficas de una secuencia se determinan perfiles de temperatura correctamente asignados. El término "zona de medición" se refiere aquí a una zona unidimensional o bidimensional que tiene una posición fija en el sistema de coordenadas del objeto de prueba. En la zona de medición existen muchas posiciones de medición.

[0020] El término "perfil de temperatura" se refiere a un perfil que se resuelve espacialmente, en el que a diferentes ubicaciones o posiciones dentro del perfil de temperatura se les asignan valores de una magnitud medida que representa la temperatura en la ubicación respectiva. El perfil de temperatura puede entenderse como una función de ubicación que describe la dependencia del valor de temperatura de la ubicación dentro del perfil de temperatura. Un perfil de temperatura puede referirse a una zona casi lineal, más o menos estrecha, a modo de perfil lineal. También puede ser un perfil 2D o un perfil de superficie, donde la distribución espacial de los valores de temperatura en un área de una forma y un tamaño determinados se describe mediante el perfil de temperatura. La magnitud de medición asignada a las diferentes ubicaciones del perfil de temperatura puede denominarse "valor de temperatura". Por regla general, en este caso no se mide directamente la temperatura, sino, por ejemplo, la intensidad o amplitud de la radiación térmica emitida por la ubicación respectiva, que se puede convertir en una temperatura local de la ubicación de un perfil utilizando los medios habituales en la termografía.

[0021] De esta manera se determinan varios (al menos dos) perfiles de temperatura, que representan el perfil de temperatura local dentro de la misma zona de medición en diferentes momentos del proceso de enfriamiento. A continuación, se determinan cuantitativamente las variaciones temporales de los valores de temperatura de los perfiles de temperatura para un gran número de posiciones de medición de la zona de medición capturadas por los perfiles de temperatura, de modo que se obtiene la evolución temporal de los valores de temperatura locales para un gran número de posiciones de medición de la zona de medición. A continuación, se evalúan las variaciones temporales según al menos un criterio de evaluación adecuado para caracterizar el flujo de calor en la zona de medición.

[0022] En el método, no solo se analizan los perfiles de temperatura con respecto a la variación de temperatura local que representan, sino también sus cambios a lo largo del tiempo. Se obtiene una secuencia o una serie de perfiles de temperatura para una zona de medición definida en la superficie y un periodo de tiempo definido. Un aspecto esencial del método es la inclusión del flujo de calor, es decir, la dinámica de la evolución temporal del perfil de temperatura y su evaluación o interpretación.

[0023] Según otra formulación, se propone el uso de una variante de la termografía de flujo de calor que se resuelve espacialmente para la detección e identificación de defectos cercanos a la superficie en objetos de prueba adecuados, donde se determina y evalúa la evolución temporal de la distribución de temperatura local detectable en la superficie del objeto de prueba. En este caso, entre otras cosas, se captura y evalúa cuantitativamente el flujo de calor lateral.

[0024] En comparación con el estado de la técnica, existe una clasificación de defectos mucho más fiable, por ejemplo, como una grieta o interferencias estructurales, ya que el método permite una separación mejorada de los efectos de la temperatura causados por defectos y los efectos no causados por el flujo de calor. Además, se mejora la evaluación de la información termográfica incluso con amplitudes de señal bajas, ya que no solo es decisiva la amplitud o intensidad de las señales de temperatura en los perfiles, sino también su dinámica en el eje temporal. Esto también da como resultado una supresión de interferencias significativamente mejorada,

incluso si la amplitud de señal útil (que no se debe a los defectos deseados) es mayor que la amplitud de señal útil, donde la amplitud de señal útil aquí se refiere a la amplitud de señal causada por interferencias estructurales.

- 5 [0025] El método de prueba permite, en particular, capturar y evaluar cuantitativamente la propagación de calor
espaciotemporal después de una entrada de calor repentina y localmente limitada. En pocas palabras, la
propagación de calor espaciotemporal se produce de tal manera que el calor concentrado en la zona de un
defecto potencial se disipa con el tiempo hacia zonas cercanas más frías del material del objeto de prueba. La
10 disipación de flujo se refleja en una distribución lateral de la temperatura de la superficie en el sentido de que un
perfil de temperatura en el punto de excitación disminuye en amplitud con el tiempo, pero hay un aumento de
temperatura en las inmediaciones de la posición de excitación. Esto significa que la forma de los perfiles de
temperatura cambia con el tiempo de forma característica en estas condiciones. Por el contrario, las influencias
de alteración más comunes, por ejemplo, las reflexiones superficiales, no están sujetas a ningún cambio
15 temporal o solo a un ligero cambio en sus propiedades locales y/o muestran un cambio temporal que se desvía
significativamente del comportamiento típico del flujo de calor (por ejemplo, un breve destello de un reflejo). Por
lo tanto, dichas influencias de alteración se pueden distinguir claramente de los defectos reales basándose en su
comportamiento espaciotemporal típico. Aunque en el perfil de temperatura con una dinámica espaciotemporal
se perciben algunas influencias de alteración, esto generalmente difiere, de manera significativa, de la
20 propagación de calor espaciotemporal, que tiene lugar en el entorno de un defecto dentro de un material
térmicamente conductor no alterado. Por lo tanto, una evaluación que analice el comportamiento
espaciotemporal de los perfiles de temperatura desde la perspectiva de las leyes de la propagación o difusión del
calor en un sólido ofrece una selectividad y una supresión de interferencias significativamente mejoradas en
comparación con los métodos convencionales.
- 25 [0026] Por lo tanto, la evaluación también se puede describir de tal manera que, durante la evaluación, los datos
termográficos registrados se comparen con una signatura, donde la signatura es una descripción de la
propagación de calor espaciotemporal en un cuerpo sólido, que busca específicamente una concentración de
calor local para restablecer el equilibrio térmico.
- 30 [0027] Los perfiles de temperatura se analizan automáticamente en un paso de evaluación preparatorio para
determinar si el perfil de temperatura muestra anomalías similares a un defecto, es decir, anomalías que
podrían deberse a un defecto, pero que no necesariamente tienen que serlo. Según la invención reivindicada, al
identificar anomalías parecidas a defectos se busca un máximo local de los valores de temperatura dentro de los
perfiles de temperatura. Un máximo local corresponde aquí a una ubicación dentro de un perfil de temperatura,
35 cuya temperatura es claramente mayor que la temperatura en las ubicaciones del perfil en el entorno inmediato
del máximo local. El propósito del paso de identificación es encontrar puntos calientes esencialmente estrechos
en un entorno que, de otro modo, sería más frío, por ejemplo, al realizar pruebas de grietas. En este paso de
identificación se pueden utilizar rutinas de filtrado adecuadas del procesamiento de imágenes, por ejemplo, para
distinguir un máximo local de ubicaciones de borde en las que la temperatura aumenta o disminuye casi de
40 manera abrupta o escalonada de un lado del entorno al otro lado del entorno en una distancia corta. Para ello se
utilizan normalmente dos o más rutinas de filtrado, que funcionan según diferentes criterios, para identificar
aquellas ubicaciones de imágenes (píxeles o grupos de píxeles) a los que se puede asignar claramente un
máximo de temperatura local.
- 45 [0028] La evaluación puede entonces concentrarse en aquellas zonas en las que se encontraron máximos de
temperatura local.
- [0029] Según la invención solicitada, durante la evaluación se determina un valor de concentración de cantidad
de calor en la zona de un máximo local de los valores de temperatura dentro de un perfil de temperatura y se
50 evalúa la variación temporal del valor de concentración de cantidad de calor. El valor de concentración de
cantidad de calor es una medida de la relación de cantidad de calor del máximo local en comparación con el
entorno cercano. Si esta concentración de cantidad de calor disminuye con el tiempo, el calor se disipa hacia el
entorno, como suele ocurrir, por ejemplo, en la zona de las grietas. Por el contrario, si el máximo local no se debe
a una interferencia estructural o a una grieta, el valor de concentración de calor muestra a menudo un
55 comportamiento claramente diferente, donde, por ejemplo, la concentración de calor puede aumentar
inicialmente incluso después de finalizar el calentamiento. Esto indica entonces que el máximo de la temperatura
local no se debe a una grieta o algo similar.
- [0030] Además de evaluar el valor de concentración de cantidad de calor, como criterio de evaluación se puede
60 evaluar la variación temporal de la amplitud de un valor de temperatura en la zona de un máximo local de los
valores de temperatura de un perfil de temperatura. A partir de esto se puede determinar, por ejemplo, la
velocidad de enfriamiento en la zona del máximo local y en sus proximidades. Se ha demostrado que las
velocidades de enfriamiento en la zona de interferencias estructurales, como grietas, dentro de un entorno que,
de otro modo, no estaría alterado, pueden describirse fácilmente mediante las leyes de la difusión del calor y, por
65 lo tanto, pueden usarse como un criterio de evaluación fiable. Por lo tanto, las grietas y otros defectos a menudo
se pueden distinguir de las interferencias no causadas por defectos basándose únicamente en las velocidades
de enfriamiento típicas.

[0031] Para poder determinar con suficiente precisión las correspondientes funciones de tiempo para la evaluación de las variaciones temporales mediante parámetros calculados, en una forma de realización preferida se evalúan juntos al menos tres perfiles de temperatura registrados consecutivamente para obtener un número adecuado de puntos de apoyo. Generalmente se evalúan juntos entre cuatro y diez perfiles de temperatura, de modo que haya un número suficiente de puntos de apoyo en el dominio del tiempo y se pueda hacer una distinción fiable entre defectos y artefactos.

[0032] Como alternativa o además de la determinación y evaluación de parámetros a partir de funciones de tiempo, también es posible determinar las variaciones temporales de los valores de temperatura dentro de los perfiles de temperatura a partir de elementos de imagen (píxeles) o grupos de elementos de imagen (grupos de píxeles). Entonces los resultados se relacionan entre sí para llegar a firmas espaciotemporales. En general, se puede utilizar cualquier variante de la evaluación de señales que permita obtener cifras o datos de medición para comparar las propiedades de la señal con los principios teóricos de la propagación de calor en el sólido. Por ejemplo, se pueden utilizar perfiles de líneas espaciotemporales, secuencias de registro, áreas, cualquier disposición de píxeles o patrón de píxeles. Lo esencial es la consideración o la inclusión conjunta de los aspectos espaciales y temporales, sin los cuales difícilmente es posible una declaración fiable sobre la probabilidad de defectos.

[0033] Es posible aplicar el método de prueba a dispositivos de prueba, en los que tanto el objeto de prueba como el dispositivo de captura para capturar imágenes termográficas son estacionarios. Esto simplifica considerablemente la asignación de la posición correcta de los perfiles de temperatura entre sí, ya que la misma zona de medición en las imágenes termográficas registradas sucesivamente corresponde a la misma zona de la imagen (mismas coordenadas de imagen) en las imágenes termográficas.

[0034] Sin embargo, en aplicaciones preferidas, el método de prueba se utiliza para probar objetos de prueba alargados, como, por ejemplo, barras, tubos, alambres o similares. Para probar objetos de prueba alargados se puede generar un movimiento relativo entre el objeto de prueba y un dispositivo de captura para capturar imágenes termográficas en paralelo a una dirección de movimiento que discurra convenientemente paralela a la dirección longitudinal del objeto de prueba alargado. Preferiblemente, el dispositivo de captura permanece inmóvil mientras el objeto de prueba se mueve con respecto al dispositivo de captura. El movimiento relativo se genera de tal manera que las zonas de superficie, que se capturaron sucesivamente con las imágenes termográficas capturadas, están dispuestas desplazadas a una cierta distancia paralela a la dirección del movimiento. Preferiblemente, las zonas de superficie capturadas en sucesión inmediata se superponen parcialmente de tal manera que cada ubicación de la superficie de prueba sea capturada por dos o más imágenes termográficas. Esto permite una prueba completa de la superficie de objetos de prueba alargados movidos en dirección longitudinal. Cada ubicación de la superficie de la muestra aparece preferiblemente en tres o más imágenes termográficas, por ejemplo, en cuatro a veinte o más imágenes termográficas, donde la ubicación es una ubicación diferente (posición de la imagen) en cada una de las imágenes termográficas debido al movimiento relativo.

[0035] La asignación de la posición correcta de los perfiles de temperatura de diferentes imágenes termográficas plantea un desafío particular cuando se prueban objetos de prueba movidos. En una variante del método, una primera imagen termográfica de una serie de imágenes termográficas capturadas en un primer momento se analiza mediante procesamiento de imágenes para identificar al menos una primera sección de imagen seleccionada que contiene datos termográficos de una primera sección de superficie con una anomalía similar a un defecto. La sección de superficie idéntica se encuentra entonces automáticamente en una segunda sección de imagen correspondiente a la primera sección de imagen. La segunda sección de imagen se encuentra en una segunda imagen termográfica capturada en un segundo momento posterior con un intervalo de tiempo desde la primera imagen termográfica. A continuación, se realiza una evaluación conjunta de los datos termográficos de la primera y segunda sección de imagen para lograr la asignación de la posición correcta.

[0036] Para la detección automática, una posición esperada de la sección de superficie que contiene la anomalía similar a un defecto en la segunda imagen termográfica se determina preferiblemente basándose en una velocidad relativa medida o conocida, de otro modo, entre el objeto de prueba y el dispositivo de captura y el intervalo de tiempo transcurrido entre el primer momento y el segundo momento con el fin de determinar la trayectoria que ha recorrido la sección de superficie en la dirección del movimiento entre el primer momento y el segundo momento en el tiempo. Esto significa que la evaluación de la segunda imagen termográfica puede concentrarse desde el principio en aquella sección de superficie en la que se encontró una anomalía similar a un defecto durante el análisis de la primera imagen termográfica capturada anteriormente.

[0037] Para encontrar la anomalía similar a un defecto, se busca preferiblemente un máximo local de los valores de temperatura dentro de al menos un perfil de temperatura lineal o plano en la primera imagen termográfica. Para ello, se pueden utilizar rutinas de filtrado adecuadas para el procesamiento de imágenes.

[0038] La invención también se refiere a un dispositivo de prueba termográfica configurado para llevar a cabo el método para la detección e identificación con resolución espacial de defectos cercanos a la superficie en un objeto de prueba. El dispositivo de la prueba comprende:

- 5 un dispositivo de calentamiento para calentar una sección del objeto de prueba de tal manera que se produzca un desequilibrio térmico entre las zonas defectuosas afectadas por defectos y el material de muestra de prueba libre de defectos;
- 10 al menos un dispositivo de captura para capturar una secuencia de al menos dos imágenes termográficas que se suceden espaciadas en el tiempo; y un dispositivo de evaluación para evaluar datos termográficos de las imágenes termográficas,
- 15 donde el dispositivo de evaluación está configurado para determinar perfiles de temperatura asignados en posición correcta a partir de las imágenes termográficas para determinar variaciones temporales de valores de temperatura a partir de los perfiles de temperatura para varias posiciones de medición de la zona de medición capturada por los perfiles de temperatura y para evaluar las variaciones temporales según al menos un criterio de evaluación que caracteriza el flujo de calor en la zona de medición. El dispositivo de la prueba está configurado para llevar a cabo el método según la invención.

20 [0039] Preferiblemente, el dispositivo de captura es una cámara de área sensible a la radiación térmica con un gran número de filas de imagen, cuya información de imagen se evalúa en conjunto.

[0040] Además de las reivindicaciones, estas y otras características también se pueden deducir de la descripción y de los dibujos, donde las características individuales pueden implementarse individualmente o en grupos en forma de subcombinaciones en una forma de realización de la invención y en otros ámbitos y pueden representar diseños ventajosos y protegibles. Los ejemplos de realización están representados en los dibujos y se explican con más detalle posteriormente.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

30 [0041]

Figura 1 muestra una forma de realización de un dispositivo de prueba para pruebas termográficas de objetos de prueba alargados hechos de material eléctricamente conductor en un proceso continuo;

35 Figura 2 muestra un ejemplo de un perfil de temperatura registrado perpendicularmente a la dirección de movimiento del objeto de prueba;

40 Figura 3 muestra en 3A una vista superior esquemática de una sección calentada del objeto de prueba movido, que se encuentra en la zona de captura de una cámara termográfica, con una sección de imagen seleccionada que contiene un defecto, también representada ampliada, y en 3B muestra una explicación de un método para la evaluación conjunta de la posición correcta de perfiles de temperatura capturados en diferentes momentos en la misma sección de superficie;

45 Figura 4 muestra en 4A y 4B la evolución temporal de partes de un perfil de temperatura en la zona de un máximo de temperatura local de la temperatura, donde en 4A se muestran las secciones asignadas a una posición correcta de perfiles de temperatura en la zona de una interferencia que no se debe a una grieta y en 4B los perfiles de temperatura correspondientes en la zona de una grieta cercana a la superficie;

50 Figura 5 muestra en las figuras 5A y 5B respectivamente las variaciones temporales de dos parámetros que caracterizan el flujo de calor en la zona del máximo de temperatura local, donde en la figura 5A están representados las variaciones temporales de los parámetros para una interferencia que no se puede atribuir a una grieta y en la figura 5A las variaciones temporales correspondientes para una grieta cercana a la superficie; y

55 Figura 6 muestra en 6A una sección de un perfil de temperatura con un máximo de temperatura local debido a una reflexión, en la figura 6B la evolución temporal del perfil de temperatura local en la zona del máximo de temperatura local mostrado en la figura 6A y en 6C la evolución temporal de dos parámetros que caracterizan el flujo de calor en la zona del máximo local.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS FORMAS DE REALIZACIÓN PREFERIDAS

65 [0042] La figura 1 muestra una representación esquemática de una forma de realización de un dispositivo de prueba termográfica 100 para pruebas de superficies completas de objetos de prueba alargados hechos de material eléctricamente conductor en un proceso continuo. En el ejemplo, el objeto de prueba 180 es una palanquilla de acero con una sección transversal rectangular, que sale de un dispositivo de laminación (no

mostrado) y se eleva con la ayuda de un dispositivo transportador (no mostrado), por ejemplo, un transportador de rodillos, a una velocidad de paso v_P prácticamente constante en el rango entre aproximadamente 0,1 m/s y 1,5 m/s en una dirección de movimiento 184 (flecha) que discurre paralela a su eje longitudinal 182. Después del laminado en caliente, la palanquilla de acero no tiene una superficie blanca, sino más bien una superficie denominada "negra", cuya temperatura superficial se sitúa normalmente entre 0 °C y 50 °C. La prueba termográfica y la evaluación de los datos termográficos capturados se explican utilizando la prueba de la superficie de muestra de prueba 185 macroscópicamente plana. También se llevan a cabo pruebas correspondientes simultáneamente para las otras tres superficies del objeto de prueba.

[0043] El dispositivo de prueba tiene un dispositivo de calentamiento inductivo 110 para calentar la sección del objeto de prueba que entra en el rango efectivo del dispositivo de calentamiento de tal manera que se produce un desequilibrio térmico entre las zonas defectuosas afectadas por defectos y el material del objeto de prueba libre de defectos. El dispositivo de calentamiento incluye una bobina de inducción 112, que está configurada como bobina de paso plana para el objeto de prueba con un plano de bobina orientado perpendicularmente a la dirección de flujo. La bobina de inducción está conectada eléctricamente a un generador de tensión alterna 115, que está conectado a un dispositivo de control central 130 del dispositivo de prueba para su control. Cuando la bobina de inducción 112 se excita con una tensión alterna de una frecuencia adecuada, se inducen corrientes parásitas en zonas cercanas a la superficie del objeto de prueba, que pueden calentar las zonas cercanas a la superficie a temperaturas superiores a la temperatura ambiente al pasar a través de la bobina de inducción. El calentamiento suele ser relativamente uniforme en zonas de superficie libres de defectos. Sin embargo, si en la sección transversal del flujo de corriente inducido existen interferencias estructurales, como grietas, cortes, huecos o similares, estas actúan como resistencias eléctricas y desvían el flujo de corriente. Esto conduce a mayores densidades de corriente y, por tanto, a mayores pérdidas de potencia en los puntos estrechos del flujo de corriente. Esta pérdida de energía en las interferencias estructurales se hace evidente mediante una generación adicional de calor, de modo que la zona defectuosa afectada localmente limitada directamente en la interferencia estructural tiene una temperatura más alta que el entorno no alterado. Esto produce un calentamiento local en comparación con el nivel de temperatura más bajo del entorno más alejado. Las diferencias de temperatura típicas entre la zona de una grieta y el entorno del material inmediatamente adyacente y no alterado suelen ser del orden de aproximadamente 1 K a 10 K. Estos aumentos locales de temperatura y su evolución espaciotemporal se utilizan en el método de prueba para la detección e identificación con resolución espacial de defectos cercanos a la superficie.

[0044] En el caso de ejemplo, el generador tiene una potencia eléctrica de hasta 150 kW y se utilizan frecuencias de tensión alterna del rango entre 10 kHz y 350 kHz. También son posibles dispositivos de calentamiento con otras especificaciones. Por ejemplo, el generador de tensión alterna puede funcionar, por ejemplo, con potencias de hasta varios MW, lo que puede resultar ventajoso, por ejemplo, en objetos de prueba de grandes dimensiones (por ejemplo, más de 800 mm de diámetro). El rango de frecuencia se puede adaptar al objeto de medición. Por ejemplo, las frecuencias de hasta 1 MHz pueden resultar útiles para encontrar defectos especialmente pequeños cercanos a la superficie, ya que, a medida que aumenta la frecuencia, disminuye la profundidad de penetración de la corriente parásita y, por tanto, disminuye el volumen de medición. Las altas frecuencias también son beneficiosas cuando se prueban aceros eléctricamente conductores con alta resistencia eléctrica y permeabilidad magnética cercana a 1 para lograr un calentamiento rápido localizado de zonas defectuosas con respecto a su entorno.

[0045] El dispositivo de calentamiento provoca un desequilibrio térmico en todo el sistema del objeto de prueba/defecto. Con la ayuda del método de prueba y del dispositivo de prueba, es posible observar, tanto en el dominio espacial como en el temporal, cómo el sistema se esfuerza por alcanzar el equilibrio térmico.

[0046] Para ello, el dispositivo de prueba presenta un dispositivo de captura 120 sensible a la radiación térmica y con resolución espacial para capturar imágenes termográficas bidimensionales, que se pueden registrar con una alta frecuencia de imagen de hasta 100 imágenes por segundo (fotogramas por segundo). El dispositivo de captura, también denominado en lo sucesivo "cámara térmica", está conectado al dispositivo de control central 130 para controlar el registro de imágenes y para supervisar y evaluar los datos termográficos obtenidos en las imágenes termográficas. En él está integrado un sistema de procesamiento de imágenes basado en ordenador, que está diseñado para evaluar los datos termográficos determinados a partir de las imágenes termográficas según diferentes criterios. Dicha cámara térmica puede visualizar la presencia y algunas propiedades de interferencias estructurales basándose en valores de temperatura locales o basándose en la radiación térmica emitida localmente y estas anomalías pueden evaluarse automáticamente utilizando medios de procesamiento de imágenes adecuados en un sistema de evaluación asociado.

[0047] La cámara térmica 120 es una cámara de área y tiene una zona de captura rectangular 122, que también se denomina aquí campo de imagen 122 y que, en este caso de ejemplo, cubre todo el ancho de la superficie de muestra de prueba 185 orientada hacia ella hasta y más allá de los bordes laterales. En este caso de ejemplo, la cámara térmica 120 cubre un campo de imagen 122 de 270 mm x 216 mm con una resolución de 640 x 512 píxeles (elementos de imagen). Un elemento de la imagen (píxel) corresponde en este caso a una sección de superficie rectangular relativamente pequeña de 0,5 mm a 0,8 mm de diámetro en la superficie de muestra de

prueba 185. Una imagen termográfica registrada con la cámara de área consta de una gran cantidad de filas que discurren esencialmente perpendiculares a la dirección longitudinal del objeto de prueba (dirección y) y columnas que discurren esencialmente paralelas a la dirección longitudinal (es decir, en la dirección y). Las imágenes termográficas se evalúan fila por fila para detectar de especialmente forma fiable errores longitudinales. Una zona de medición 124 linealmente estrecha, que pertenece a una fila de la cámara térmica, discurre transversalmente a un defecto 188. Esta zona de medición también se denomina claramente línea de medición.

[0048] En el momento t_1 representado en la figura 1, el defecto 188 cercano a la superficie está situado en forma de una grieta longitudinal que discurre más o menos paralela a la dirección longitudinal del objeto de prueba en las proximidades del lado de entrada de la zona de captura opuesta a la bobina de inducción 112. Las posiciones de la misma grieta longitudinal en momentos posteriores $t_2 > t_1$ y $t_3 > t_2$ están representadas como líneas discontinuas para ilustrar que un mismo defecto o una misma sección de superficie puede estar en el área de detección 122 de la cámara térmica en diferentes veces, donde, sin embargo, las posiciones de las imágenes dentro de la imagen termográfica están desplazadas entre sí en la dirección de movimiento 184 una distancia determinada en la dirección de movimiento 184, dependiendo de la velocidad de transmisión v_P y del intervalo de tiempo entre los momentos de registro de las imágenes termográficas que se suceden espaciadas en el tiempo.

[0049] La frecuencia de registro de imágenes utilizada de la cámara térmica está adaptada a la velocidad de rendimiento del objeto de prueba de tal manera que cada sección de superficie de muestra de prueba 185 aparece en diferentes puntos en varias imágenes termográficas, por ejemplo, en al menos 5 o al menos 10 o al menos 15 imágenes termográficas registradas con un intervalo de tiempo entre sí.

[0050] Una unidad de visualización y operación 140 conectada al dispositivo de control tiene una pantalla en la que se pueden mostrar datos y relaciones determinados a partir de las imágenes termográficas. Con la ayuda de un teclado y/o otros medios de entrada, un operador puede configurar y operar cómodamente el dispositivo de prueba para diferentes tareas de prueba.

[0051] Un dispositivo de medición de velocidad 150 para determinar la velocidad de movimiento actual v_P del objeto de prueba también está conectado al dispositivo de control 130. En este caso de ejemplo, este dispositivo, que sirve como indicador de trayectoria, funciona sin contacto con ayuda de radiación láser. En otras formas de realización, se puede proporcionar un indicador de trayectoria táctil, por ejemplo, con una rueda de medición que se desliza sobre la superficie de muestra de prueba.

[0052] La precisión del método de prueba termográfica puede verse fuertemente influenciada por las fluctuaciones en la emisividad de la superficie de muestra de prueba capturadas termográficamente. Para mantener las influencias negativas lo más bajas posible se lleva a cabo una homogeneización activa de la emisividad de la superficie de muestra de prueba medida humedeciendo uniformemente la superficie de muestra de prueba con un líquido, por ejemplo, agua, usando un dispositivo humectante 160 antes de pasar a través de la bobina de inducción. Esta técnica ha demostrado ser eficaz a temperaturas de superficie de hasta 50 °C para evitar en gran medida la aparición de pseudoanuncios debidos a fluctuaciones locales de emisividad.

[0053] Si el dispositivo de prueba identifica claramente una anomalía como un defecto, se puede marcar con la ayuda de un dispositivo de marcado 170 automático conectado al dispositivo de control 130 mediante pulverización de pintura o similar, de modo que sea posible cualquier procesamiento posterior de la superficie de muestra de prueba alterada o la clasificación selectiva de las zonas demasiado alteradas.

[0054] A continuación se describe una variante preferida de un método de prueba que se puede llevar a cabo con la ayuda del dispositivo de prueba para la detección e identificación con resolución espacial de defectos cercanos a la superficie en objetos de prueba que pasan a través del dispositivo de prueba a alta velocidad de rendimiento. Las zonas del objeto de prueba cercanas a la superficie se calientan inductivamente mediante la bobina de inducción 112, donde se producen máximos de temperatura locales en la zona de grietas y otras interferencias estructurales. Después de que las secciones correspondientes del objeto de prueba pasen a través de la bobina de inducción, estas zonas se enfrían nuevamente. El dispositivo de captura 120 está montado directamente detrás de la bobina de inducción en la dirección de movimiento y captura las zonas de superficie en esta fase de enfriamiento.

[0055] En un primer paso del método, se identifican anomalías térmicas en la parte de la superficie de muestra de prueba movida hacia la zona de captura 122. Para ello, se evalúan las líneas correspondientes asignadas al lado de entrada, para obtener, por ejemplo, un perfil de temperatura que se resuelve espacialmente (perfil de línea) a lo largo de una línea de medición 124 perpendicular a la dirección de paso. La figura 2 muestra como ejemplo dicho perfil de temperatura. La posición POS de las ubicaciones de medición dentro de una zona de medición similar a una línea que discurre perpendicularmente a la dirección de movimiento (dirección y) en la dirección x se especifica en la abscisa indicando los números de los píxeles correspondientes (elementos de imagen) de una fila del campo de la imagen. La ordenada representa la amplitud AMP de la radiación térmica asociada con las ubicaciones y está representada en el ejemplo como la temperatura absoluta de la superficie en grados Celsius. Se puede observar que la temperatura de la superficie entre los bordes laterales

(aproximadamente en los números de píxeles 90 y 540) se encuentra en el rango entre 55 °C y 60 °C y varía localmente en algunos K. El perfil de temperatura contiene dos anomalías, a saber, un primer máximo de temperatura local ST alrededor del píxel n.º 150 y un segundo máximo de temperatura local DEF alrededor del píxel n.º 495. En ambos máximos de temperatura locales, la diferencia de temperatura ΔT con respecto al entorno inmediato es de aproximadamente 6 a 7 K. Una evaluación explicada con más detalle más adelante muestra que el primer máximo de temperatura local ST se remonta a una interferencia que no puede atribuirse a una grieta u otra interferencia estructural, mientras que el segundo máximo de temperatura DEF fue causado en realidad por una grieta cercana a la superficie. Se puede ver que la magnitud de la diferencia de temperatura ΔT por sí solo no es un criterio fiable para distinguir entre interferencias estructurales reales y otras anomalías que no pueden atribuirse a interferencias estructurales.

[0056] Cada imagen termográfica contiene un gran número de dichos perfiles de temperatura que se resuelven espacialmente en la dirección x. La aparición de máximos de temperatura locales es capturada automáticamente por el *software* de evaluación del procesamiento de imágenes, donde se utilizan rutinas de filtrado adecuadas para comparar los valores de temperatura de píxeles o grupos de píxeles dentro de un perfil de temperatura con valores de temperatura de píxeles o grupos de píxeles adyacentes y, basándose en la comparación, identificar claramente los máximos de temperatura locales como tales y distinguirlos de otros artefactos, por ejemplo, la fuerte caída de temperatura en un borde. Al filtrar, el *software* de evaluación trabaja fila por fila dentro de franjas que discurren transversalmente a la dirección de movimiento y que contienen en cada una de ellas un gran número de perfiles de temperatura adyacentes. La figura 3 muestra dicha franja 125, que contiene el defecto 188. La probabilidad de la presencia de un defecto similar a una grieta en la dirección longitudinal aumenta en esta evaluación si en aproximadamente la misma posición de píxel en un gran número de perfiles de temperatura adyacentes dentro de la franja se produce un máximo de temperatura local de altura perceptible.

[0057] El método de prueba se basa no solo en la evaluación de perfiles de temperatura espaciales, es decir, aquellos perfiles de temperatura que representan la distribución de temperatura local, sino también en el análisis de sus cambios a lo largo del tiempo. Esta combinación también se denomina aquí análisis espaciotemporal. Para ello, no basta con analizar un único perfil de temperatura, sino que, para la misma zona de medición de la superficie, se relacionan entre sí varios perfiles de temperatura registrados a una distancia temporal entre sí en la posición correcta para poder analizar la dinámica espaciotemporal de la evolución de la distribución de la temperatura.

[0058] En la forma de realización del método de prueba aquí descrito, se utiliza una variante especial de un reconocimiento de patrones para encontrar una anomalía identificada en una imagen termográfica anterior, que podría representar un defecto, en la posición correcta en imágenes termográficas registradas posteriormente, y, por lo tanto, crear la posibilidad de un movimiento relativo a pesar del movimiento del objeto de prueba hacia la cámara térmica para obtener una secuencia temporal de varios perfiles de temperatura de la misma zona de medición. Para ello, se evalúa fila por fila una franja 125 que pertenece a una sección de superficie específica de una primera imagen termográfica temprana en el tiempo y se analiza en cuanto a la presencia de anomalías, en particular máximos de temperatura locales. A partir de los datos de temperatura de las filas individuales, se calcula un área relacionada que encierra el área de máximos de temperatura locales notables. En la figura 3 se muestra una sección de imagen 128 rectangular seleccionada, que encierra el defecto 188 a la izquierda dentro de la franja 125 y a la derecha en una vista ampliada. Las coordenadas locales de la sección de imagen 128 seleccionada, es decir, su posición dentro de la imagen termográfica, representan la posición de la sección de superficie asociada del objeto de prueba que contiene el defecto 188 en el momento en que se registró la primera imagen termográfica. La información de imagen contenida en la sección de imagen seleccionada a partir de los píxeles conectados espacialmente se puede tratar en el *software* de procesamiento de imágenes como un objeto binario grande (BLOB) y representa un determinado patrón de datos, que se puede encontrar nuevamente en imágenes termográficas registradas más tarde.

[0059] Utilizando el "patrón" de la zona representado por la estructura de datos alrededor del defecto 188, ahora se busca el mismo patrón en varias imágenes termográficas posteriores registradas en intervalos de tiempo para encontrar aquellas secciones de imagen que correspondan con la mayor precisión posible a la sección de superficie que se utilizó al analizar la primera imagen termográfica para calcular el patrón que estaba buscando. Preferiblemente, se buscan las secciones de imagen correspondientes a una sección de superficie determinada en al menos 5 a 10 imágenes termográficas registradas consecutivamente y luego se evalúan de manera conjunta sus informaciones de imagen.

[0060] Para limitar espacialmente la zona de búsqueda en imágenes termográficas registradas posteriormente y, por lo tanto, acelerar la evaluación, se determina una posición esperada de la sección de superficie, que contiene la anomalía similar a un defecto, en las imágenes termográficas registradas posteriormente en base a la velocidad de movimiento v_p del objeto de prueba medida con la ayuda del sistema de medición de velocidad 150, la dirección de movimiento 184 y el intervalo de tiempo transcurrido entre los tiempos de registro individuales de las imágenes termográficas para calcular la trayectoria que recorrió la sección de superficie de interés entre el momento en el que se basó el primer análisis y el momento en que se registró la imagen termográfica posterior. Se ha demostrado que, de este modo, se puede recuperar la sección superficie de interés o los datos

pertenecientes a este tramo, incluso a velocidades de paso ligeramente fluctuantes, con una precisión en el rango de la precisión de medición del indicador de trayectoria (aquí, por ejemplo, aproximadamente ± 1 mm), que, en este caso de ejemplo, corresponde a una precisión de localización del orden de aproximadamente ± 2 píxeles en la superficie de muestra de prueba. Las correcciones finales para la superposición en la posición correcta se realizan computacionalmente utilizando *software* mediante seguimiento, es decir, mediante reconocimiento de patrones, que logra una fidelidad posicional efectiva de aproximadamente ± 1 píxel o $\pm 0,5$ mm en la superficie de muestra de prueba.

[0061] Este procedimiento tiene en cuenta que las condiciones de prueba en la práctica no suelen ser las ideales. Por lo tanto, por ejemplo, debido al deslizamiento entre el material de prueba y el sistema transportador, pueden ocurrir desviaciones del material de prueba y/o frenado del material de prueba al cargarlo sobre un rodillo y la consiguiente aceleración, fluctuaciones de velocidad y otras causas de inexactitud de posición. Los problemas de prueba resultantes se evitan mediante la combinación de la medición de la velocidad, la detección resultante de secciones de superficie potencialmente defectuosas y la búsqueda posterior de patrones de superficie (seguimiento).

[0062] En cada una de las secciones de imagen capturadas consecutivamente, se pueden determinar y evaluar juntos uno o más perfiles de temperatura que recorren la ubicación del defecto potencial. Si las ubicaciones de los perfiles de temperatura, como se muestra en la figura 3B, están cada una en el mismo lugar dentro de la sección de imagen seleccionada, cada uno de los perfiles de temperatura asignados en la posición correcta corresponden a la misma zona de medición en forma de línea de la superficie del objeto de prueba, donde esta zona de medición se extiende más allá de la posición del posible defecto. Para explicar esto, a la izquierda de la figura 3B se muestran tres secciones de imagen 128, 128' y 128'', que pertenecen a la misma sección de superficie en diferentes momentos t_1 , $t_2 > t_1$ y $t_3 > t_2$, donde en cada una de las secciones de imagen se determina un perfil de temperatura que discurre en la dirección x a lo largo del defecto. En la parte derecha de la figura se muestran juntos los perfiles de temperatura registrados consecutivamente, donde la abscisa indica la posición POS (x) en la dirección x y la ordenada indica la temperatura T. De este modo, es posible determinar con gran precisión la propagación de calor espaciotemporal en la zona de un posible defecto en un objeto de prueba movido.

[0063] Cada uno de los perfiles de temperatura representa una zona que discurre transversalmente al defecto, donde el defecto se encuentra aproximadamente en el centro. Cada uno de los perfiles de temperatura tiene un máximo de temperatura local, cuya altura disminuye con el tiempo en relación con el entorno (cuantificada, por ejemplo, por la diferencia de temperatura ΔT), mientras que la anchura del máximo en el espacio local, indicada, por ejemplo, por la anchura a media altura, aumenta con el tiempo. Estos perfiles de temperatura locales, asignados en la posición correcta y registrados sucesivamente permiten ahora sacar conclusiones cuantitativas sobre la propagación de calor espaciotemporal en la zona de un posible defecto y pueden evaluarse de la siguiente manera.

[0064] La figura 4 muestra en 4A y 4B representaciones comunes de un gran número de perfiles de temperatura asignados en la posición correcta, donde los perfiles de temperatura superiores en la parte superior de las ilustraciones se capturaron antes que los perfiles de temperatura que se muestran a continuación.

[0065] La figura 4A muestra perfiles de temperatura típicos para una interferencia ST, que produce un máximo de temperatura local aproximadamente en el píxel n.º 7, pero que no se debe a una grieta cercana a la superficie. A modo de comparación, la figura 4B muestra los perfiles de temperatura asignados en la posición correcta en la zona de un defecto DEF similar a una grieta, donde también aquí el máximo de temperatura local se encuentra en la zona del píxel n.º 7. Los perfiles de temperatura asignados en la posición correcta se analizan ahora mediante criterios de evaluación que, basándose en la evolución espaciotemporal de los perfiles de temperatura, permiten sacar conclusiones relativamente fiables sobre si la evolución espaciotemporal de la distribución de la temperatura corresponde a la dinámica esperada causada por el flujo de calor en la zona de una grieta u otra interferencia estructural o sigue otras leyes.

[0066] Uno de los criterios o parámetros de evaluación es la amplitud AMPM del valor de temperatura en la ubicación del máximo de temperatura local dentro de un perfil de temperatura. El parámetro según la invención que ha demostrado ser muy fiable para evaluar la dinámica de la propagación de calor es el valor de concentración de calor KONZ en la zona de un máximo local de los valores de temperatura dentro de los perfiles de temperatura. La figura 5 muestra en 5A el proceso temporal de la amplitud AMPM y el valor de concentración KONZ en diferentes pasos de tiempo t para una interferencia S, que no es causada por una grieta y, en la figura 5B, el proceso temporal de los mismos parámetros en la misma ventana de tiempo para una grieta DEF cercana a la superficie. En las ordenadas se indica la diferencia de temperatura ΔT de la temperatura en la ubicación del máximo local en comparación con el entorno.

[0067] En un gran número de experimentos se ha demostrado que en la zona de las grietas tanto la velocidad de enfriamiento, o el cambio de temperatura en la ubicación del máximo de temperatura local a lo largo del tiempo, como la pérdida de concentración son relativamente grandes y difieren significativamente de la diferenciación

correspondiente entre valores, los cuales pueden detectarse en la zona de interferencias que no se deben a grietas u otras interferencias estructurales. En el caso de la temperatura máxima, que está representada por la amplitud AMPM de la temperatura en la ubicación del máximo local, se ha demostrado que esta disminuye continuamente una vez finalizada la fase de calentamiento, es decir, durante el enfriamiento, y a una velocidad de enfriamiento relativamente alta. En este caso de ejemplo, se supone una alta probabilidad de la presencia de una grieta si la velocidad de enfriamiento en la zona de al menos cinco imágenes termográficas registradas consecutivamente es mayor que un valor umbral predeterminado para la velocidad de enfriamiento. El valor de concentración de cantidad de calor KONZ es una medida de la proporción entre la cantidad de calor directamente en el máximo de temperatura local en comparación con el entorno cercano. Si el valor de concentración de calor disminuye con el tiempo, esto indica que el calor se disipa lateralmente hacia el entorno. Este es el caso, por ejemplo, de las grietas y, por lo tanto, se considera una indicación de que la señal observada fue causada por la propagación de calor en el sólido cerca de una grieta.

[0068] Por el contrario, en el caso de ejemplo explicado con referencia a la figura 5A de una interferencia que no está causada por una grieta, la concentración de cantidad de calor KONZ es desde el principio menor que en el caso de una grieta, además, el valor de concentración de cantidad de calor aumenta inicialmente al comienzo del intervalo de tiempo observado antes de disminuir gradualmente. La amplitud máxima AMPM también aumenta inicialmente antes de disminuir a una velocidad de enfriamiento relativamente baja, que es significativamente menor que la velocidad de enfriamiento esperada en la zona de una grieta (figura 5B).

[0069] También pueden ocurrir otras desviaciones en el comportamiento espaciotemporal de la concentración de cantidad de calor del comportamiento típico causado por el flujo de calor en el caso de interferencias y pueden usarse como una indicación de una interferencia que no se debe a una grieta o similar. Por ejemplo, el valor de concentración de cantidad de calor puede permanecer prácticamente igual durante un largo período de tiempo o parecer aumentar o disminuir desproporcionadamente.

[0070] Estos ejemplos muestran que, a través del análisis y la evaluación cuantitativa de las evoluciones espaciotemporales de los beneficios de temperatura, es posible una diferencia fiable entre diferentes causas para los máximos de temperatura locales inicialmente determinados en un perfil de temperatura. Si, en principio, las características descritas en relación con las figuras 4B y 5B se identifican cuando se identifica inicialmente una anomalía, la causa se clasifica como una grieta y la sección de superficie correspondiente se marca opcionalmente mediante el dispositivo de marcado 170. Si, por otro lado, el análisis espaciotemporal muestra un comportamiento atípico para grietas, huecos y otras interferencias estructurales (véanse, por ejemplo, las figuras 4A y 5A), no se produce ningún anuncio de grieta. De este modo se pueden evitar pseudoanuncios con gran fiabilidad. La inclusión de la propagación de calor espaciotemporal en la zona de un defecto potencial contribuye decisivamente a la supresión de interferencias en la detección e identificación de defectos con señales termográficas.

[0071] Basándose en la figura 6, se explica de nuevo a modo de ejemplo cómo el análisis de la distribución del calor espaciotemporal puede contribuir a la supresión de interferencias. Para ello, la figura 6A muestra una sección de un perfil de temperatura, que contiene un máximo de temperatura local muy pronunciado en la zona del píxel 455 con una diferencia de temperatura ΔT de al menos 10 K con respecto al entorno. En algunos sistemas de prueba convencionales, dichos anuncios se considerarían automáticamente como una indicación segura de la presencia de una grieta profunda y el elemento de prueba se marcaría en consecuencia y posiblemente se descartaría. Sin embargo, el análisis espaciotemporal de la propagación de calor muestra que no se trata de una grieta. En la figura 6B se muestran perfiles de temperatura asignados en la posición correcta de la zona del máximo local para diferentes momentos. Una particularidad de los perfiles de la figura 4 es que el perfil con mayor amplitud se registró más tarde en el tiempo ($t_2 > t_1$) que el perfil con una amplitud claramente menor registrado en el momento t_1 anterior. La anomalía también se puede ver en las variaciones temporales de los parámetros amplitud en el máximo local (AMPM) y el valor de concentración de cantidad de calor (KONZ) que se muestran en la figura 6C. Ambos valores aumentan con el tiempo, lo que no puede explicarse por la propagación de calor en la zona de una grieta calentada localmente. En este caso de ejemplo, el fuerte máximo de temperatura local mostrado en la figura 6A se debe a una reflexión en la ubicación correspondiente en la superficie de muestra de prueba. Dado que la evolución temporal de los perfiles de temperatura no muestra ningún comportamiento de propagación típico de las grietas, una reflexión de este tipo no daría lugar a una clasificación como grieta. Sin embargo, en los sistemas convencionales, lo más probable es que el reflejo se interprete erróneamente como una grieta.

[0072] Además del valor de concentración de calor, también se pueden utilizar otros parámetros como criterio de evaluación. Para ello, se pueden utilizar, por ejemplo, derivadas de las funciones temporales descritas, por ejemplo, el cambio de la velocidad de enfriamiento con el tiempo. Dado que la propagación de calor en el núcleo puede describirse mediante soluciones de la ecuación de difusión del calor, también es posible cuantificar la evolución temporal de los perfiles de temperatura en la zona de un máximo local ajustando una curva gaussiana o una función de error, donde, en estos casos, si el ajuste es bueno, se puede suponer que la propagación de calor está dominada por el flujo de calor, mientras que un ajuste deficiente sugiere otras causas. También es posible adaptar polinomios como funciones de aproximación a los perfiles de temperatura y distinguir entre los

defectos deseados (por ejemplo, grietas) e interferencias no críticas (por ejemplo, reflexiones) mediante el análisis de coeficientes polinomiales.

REIVINDICACIONES

1. Método de prueba termográfica para la detección e identificación con resolución espacial de defectos cercanos a la superficie en un objeto de prueba con los siguientes pasos:

calentar una sección del objeto de prueba mediante inducción o ultrasonidos de tal manera que se produzca un desequilibrio térmico entre las zonas defectuosas afectadas por defectos y el material del objeto de prueba libre de defectos, donde un entorno libre de defectos de una zona defectuosa se calienta en menor medida que la zona defectuosa;

capturar una secuencia de imágenes termográficas espaciadas en el tiempo dentro de una fase de propagación de calor, donde cada imagen termográfica representa una distribución de temperatura local en una zona de superficie del objeto de prueba capturada por la imagen termográfica;

determinar perfiles de temperatura asignados en la posición correcta a partir de las imágenes termográficas, donde un perfil de temperatura es un perfil de resolución espacial, en el que los valores de una variable de medición, que representa la temperatura en la ubicación respectiva, están asociados en cada caso a diferentes ubicaciones dentro del perfil de temperatura, y donde cada perfil de temperatura asignado en la posición correcta está asociado a la misma zona de medición de la superficie del objeto de prueba;

determinar variaciones temporales de valores de temperatura a partir de los perfiles de temperatura para varias posiciones de medición de la zona de medición capturadas por los perfiles de temperatura; y

evaluar las variaciones temporales según al menos un criterio de evaluación que caracterice el flujo de calor en la zona de medición, donde, durante la evaluación, se busca al menos un máximo local de los valores de temperatura dentro de los perfiles de temperatura,

se determina un valor de concentración de calor en la zona del máximo local de los valores de temperatura dentro de los perfiles de temperatura y

se evalúa una variación temporal del valor de concentración de calor para evaluar el flujo de calor lateral, donde el valor de concentración de calor es una medida de la relación de la proporción entre la cantidad de calor directamente en el máximo de temperatura local en comparación con el entorno cercano de tal manera que el valor de concentración de calor disminuye con el tiempo a medida que el calor se disipa lateralmente hacia el entorno.

2. Método de prueba termográfica según la reivindicación 1, en el que, durante la evaluación, se evalúa una variación temporal de la amplitud de los valores de temperatura en la zona del máximo local.

3. Método de prueba termográfica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que, durante la evaluación, se evalúan juntos al menos tres, preferentemente entre cuatro y veinte perfiles de temperatura asignados en la posición correcta.

4. Método de prueba termográfica según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que, para probar un objeto de prueba alargado, se genera un movimiento relativo entre el objeto de prueba y un dispositivo de captura para capturar las imágenes termográficas en una dirección de movimiento que discurre preferiblemente paralela a una dirección longitudinal del objeto de prueba, de tal manera que las zonas de superficie capturadas con las imágenes termográficas estén desplazadas entre sí en la dirección de movimiento, donde las zonas de superficie de las imágenes termográficas registradas inmediatamente de manera consecutiva se superponen preferiblemente en una zona de superposición.

5. Método de prueba termográfica según la reivindicación 4, en el que el dispositivo de captura está montado de forma estacionaria y el objeto de prueba alargado se mueve con respecto al dispositivo de captura.

6. Método de prueba termográfica según la reivindicación 4 o 5, en el que se llevan a cabo los siguientes pasos:

analizar una primera imagen termográfica, capturada en un primer momento, de una secuencia de imágenes termográficas para identificar al menos una primera sección de imagen seleccionada, que contiene una sección de superficie con una anomalía similar a un defecto;

encontrar automáticamente una segunda sección de imagen, que corresponde a la primera sección de imagen, en una segunda imagen termográfica, capturada en un segundo momento posterior, espaciada en el tiempo con respecto a la primera imagen termográfica;

evaluación conjunta de datos termográficos de la primera sección de imagen y de la segunda sección de imagen,

donde, al identificar anomalías similares a defectos, se busca preferentemente un máximo local de los valores de temperatura dentro de los perfiles de temperatura.

7. Método de prueba termográfica según la reivindicación 4, 5 o 6, en el que, para encontrar automáticamente una posición esperada de la sección de superficie que contiene la anomalía similar a un defecto, en la segunda imagen termográfica se determina la dirección del movimiento y el tiempo transcurrido entre el primer momento y el segundo momento basándose en la velocidad relativa entre el objeto de prueba y el dispositivo de captura, donde se mide preferentemente la velocidad relativa, en particular la velocidad del objeto de prueba.

8. Dispositivo de prueba termográfica para la detección e identificación con resolución espacial de defectos cercanos a la superficie en un objeto de prueba con:

5

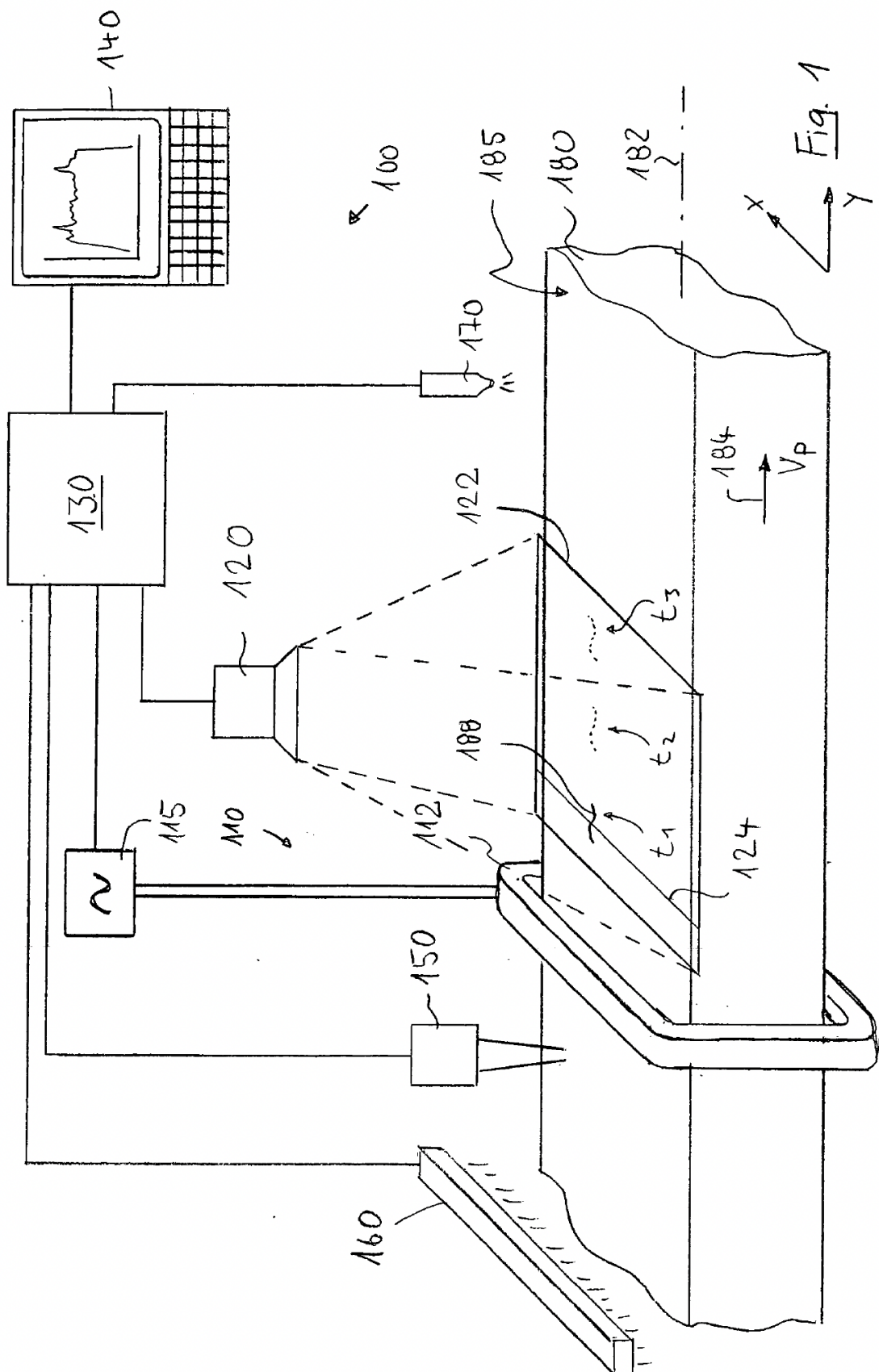
un dispositivo de calentamiento (110), que funciona por inducción o ultrasonidos, para calentar una sección del objeto de prueba (180) de tal manera que se produzca un desequilibrio térmico entre las zonas defectuosas afectadas por defectos y el material del objeto de prueba libre de defectos, donde un entorno libre de defectos de una zona defectuosa se calienta en menor medida que la zona defectuosa;

10

al menos un dispositivo de captura (120) para capturar una secuencia de al menos dos imágenes térmicas que se suceden espaciadas en el tiempo; y

un dispositivo de evaluación para evaluar datos termográficos a partir de las imágenes termográficas, donde el dispositivo de la prueba está configurado para llevar a cabo el método de prueba según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

15



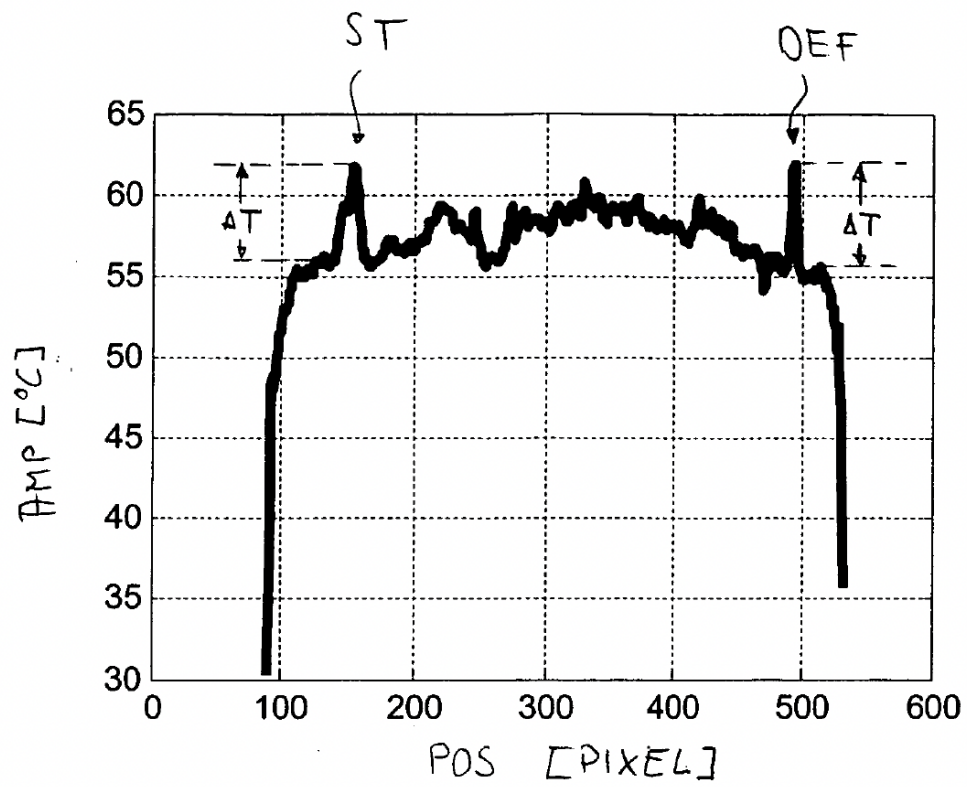


Fig. 2

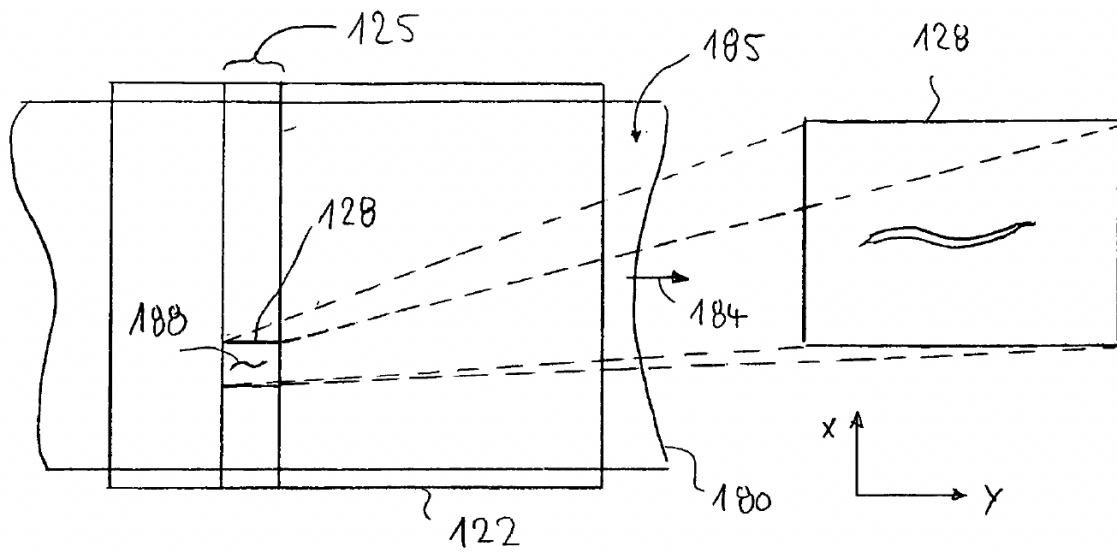


Fig. 3A

Fig 3B

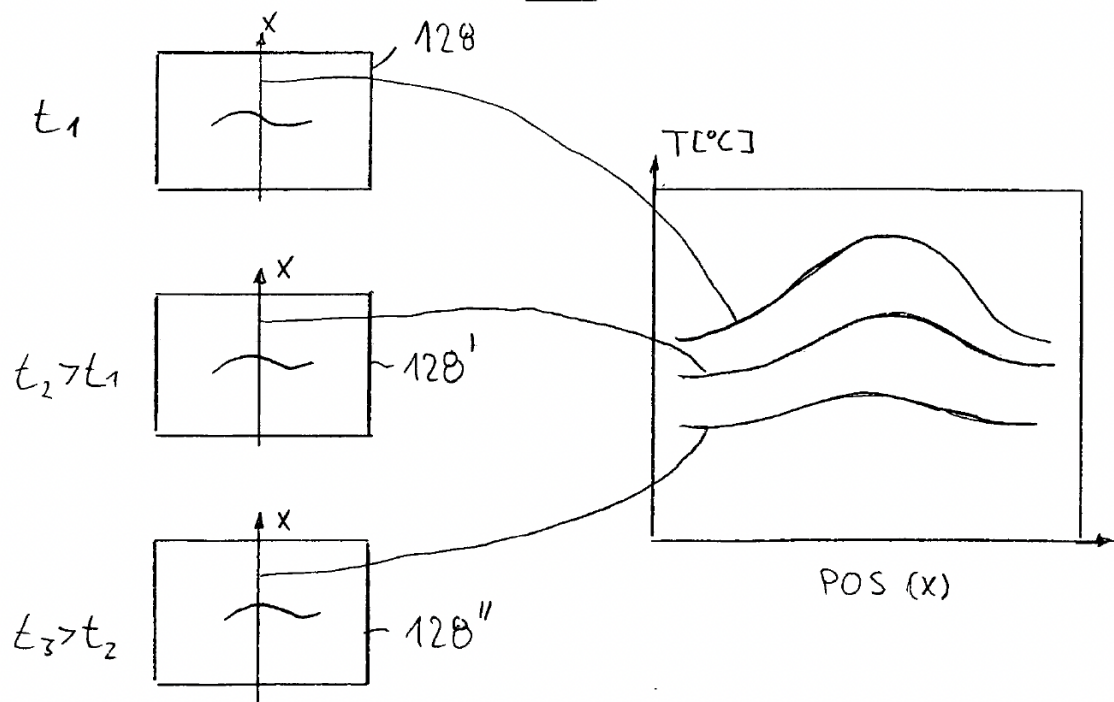


Fig. 3

Fig. 4

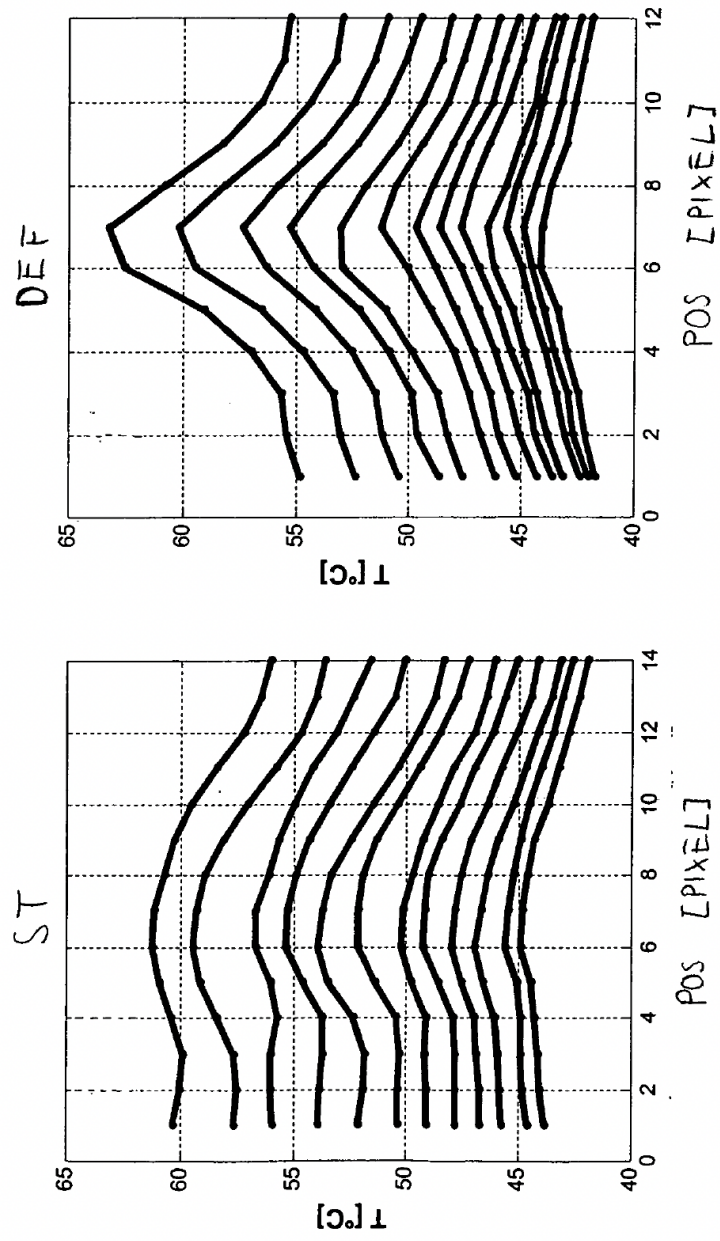


Fig. 4B

Fig. 4A

Fig. 5

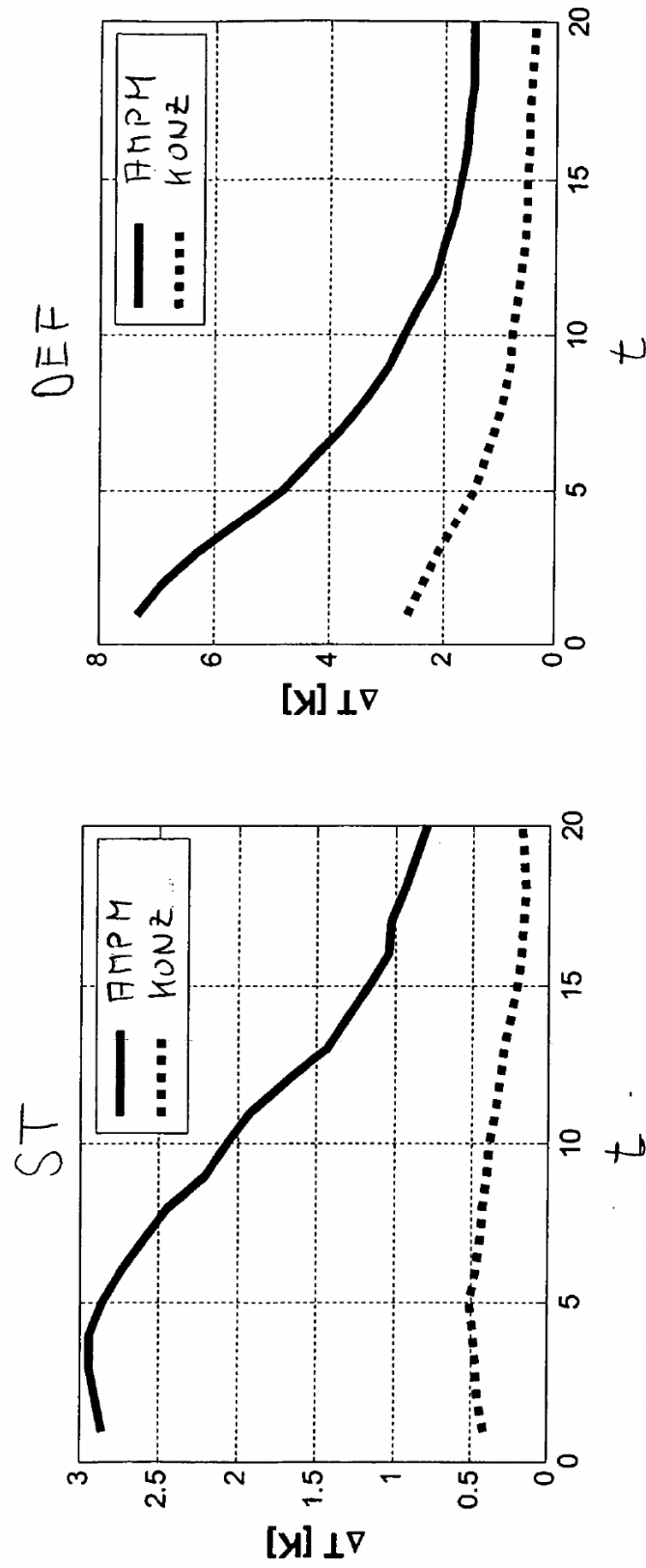


Fig. 5A

Fig. 5B

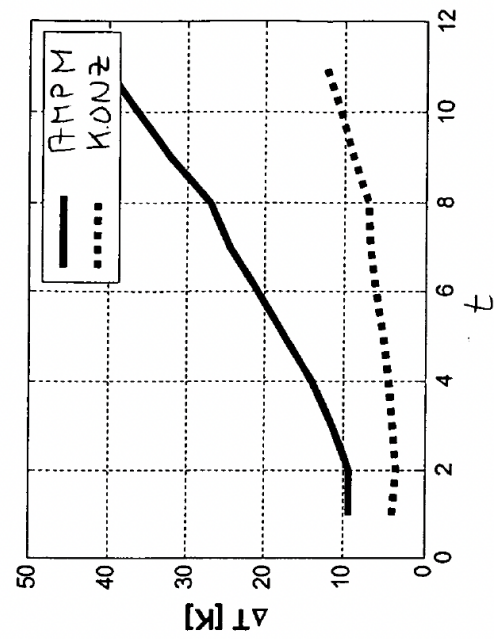


Fig. 6C

Fig. 6

