

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 736 526**

51 Int. Cl.:

F28D 7/02 (2006.01)
F28D 7/04 (2006.01)
G01M 5/00 (2006.01)
B21D 11/06 (2006.01)
B21D 53/06 (2006.01)
B23P 15/26 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **09.08.2016** E 16001769 (5)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.05.2019** EP 3282213

54 Título: **Procedimiento para la determinación de una resistencia de un termocambiador de haz tubular y procedimiento de fabricación**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
02.01.2020

73 Titular/es:

LINDE AKTIENGESELLSCHAFT (100.0%)
Klosterhofstrasse 1
80331 München, DE

72 Inventor/es:

HÖLZL, REINHOLD;
SPREEMANN, JÜRGEN y
STEFANESCU, ADRIANA

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 736 526 T3

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

DESCRIPCIÓN

Procedimiento para la determinación de una resistencia de un termocambiador de haz tubular y procedimiento de fabricación

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para la determinación de una rigidez o de una resistencia de un termocambiador de haz tubular, así como a un procedimiento para la determinación de un estado como, por ejemplo, de una resistencia o de una vida útil de un termocambiador de haz tubular, así como a un procedimiento para la fabricación del mismo mediante el uso del procedimiento según la presente invención.

10 En los termocambiadores de haz tubular, varios tubos delgados se enrollan en forma de espiral en muchas capas alrededor de un tubo central. Los termocambiadores de haz tubular también se conocen como intercambiadores de calor enrollados en espiral. Se utilizan principalmente para el tratamiento de fluidos como los líquidos y deben soportar grandes fluctuaciones de temperatura y presión.

15 Durante la fabricación, el transporte y el funcionamiento, los correspondientes termocambiadores de haz tubular o los materiales contenidos en el interior están expuestos especialmente a influencias mecánicas y térmicas. Por ejemplo, las propiedades de los materiales y las resistencias deben adaptarse a las respectivas situaciones de aplicación y demás requisitos. En este caso, especialmente el peso de los numerosos tubos enrollados en el respectivo tubo central y/o en la capa de bobinado situada por debajo juega un papel importante.

20 Se ha demostrado que en la fabricación de los termocambiadores de haz tubular correspondientes no se puede descuidar la sollicitación mecánica interna. En los procedimientos de fabricación conocidos, el tubo central y los tubos de bobinado semienrollados giran alrededor de un eje de haz. Aquí, el sistema formado por el tubo central y los tubos de bobinado a enrollar a su alrededor se carga mecánicamente entre los puntos de apoyo. En este caso resulta deseable poder estimar la resistencia variable de los termocambiadores de haz tubular resultantes. En el pasado, las resistencias o las rigideces de estos sistemas se calculaban mediante modelos sencillos teniendo en cuenta varillas o cilindros de recambio.

25 También resulta deseable predecir la sollicitación mecánica y térmica de los termocambiadores de haz tubular correspondientes durante el funcionamiento, a fin de estimar su vida útil, la susceptibilidad al mantenimiento o la durabilidad. Esto requiere procedimientos de simulación que tengan en cuenta las sollicitaciones mecánicas y las influencias termodinámicas. En todas estas simulaciones, la determinación fiable de la rigidez del sistema de haces de tubos resulta especialmente deseable.

30 Por este motivo, una tarea de la presente invención consiste en proporcionar un modelo de simulación mejorado y posibilidades de determinación, a fin de registrar los termocambiadores de haz tubular.

Esta tarea se resuelve mediante un procedimiento con las características de la reivindicación 1. Las reivindicaciones dependientes describen variantes perfeccionadas opcionales.

35 Por consiguiente, se propone un procedimiento para la determinación de una rigidez de un termocambiador de haz tubular. El termocambiador de haz tubular considerado comprende un tubo central y tubos de bobinado enrollados alrededor del tubo central formando un haz de tubos, enrollándose los tubos de bobinado alrededor del tubo central en varias capas y con un ángulo de bobinado de capa respectivo. Se realizan los siguientes pasos:

40 - determinación de un parámetro de resistencia geométrico de una capa de bobinado respectiva, comprendiendo el parámetro de resistencia geométrico una relación de superficie de una superficie de sección transversal de tubo de bobinado con una superficie de sección transversal de celda, resultando la superficie de sección transversal de celda de la distancia axial entre los tubos de bobinado y un diámetro exterior de los tubos de bobinado;

- corrección de la relación de superficie en un factor de corrección para la consideración de la orientación de los tubos de bobinado de la respectiva capa de bobinado en relación con la fuerza de la gravedad que actúa sobre los tubos de bobinado; y

45 - determinación de la rigidez de la capa de bobinado correspondiente en dependencia de la relación de superficie corregida y del módulo de elasticidad del material del tubo de bobinado.

50 En el procedimiento propuesto, la orientación de los tubos de bobinado en relación con la fuerza de la gravedad se tiene en cuenta mediante un factor de corrección. En determinadas situaciones de fabricación de termocambiadores de haz tubular, el tubo central se desarrolla horizontalmente a lo largo de la dirección del eje de haz. Los tubos de bobinado contribuyen especialmente por capas a una resistencia del termocambiador de haz tubular. Sin embargo, en los modelos supuestamente simplificados del pasado, las capas de bobinado se consideraban simples cilindros circulares, por lo que no se tuvo en cuenta la influencia del bobinado en espiral de los tubos de bobinado. Ahora se propone determinar el factor de corrección en función del ángulo de bobinado de la capa. Así se consigue mejorar una estimación o una determinación de la rigidez.

55 En situaciones de funcionamiento determinadas, la dirección del eje de haz se desarrolla verticalmente, de manera que la fuerza de la gravedad actúe vectorialmente a lo largo del tubo central. En esta configuración también se tiene en cuenta, con la ayuda del factor de corrección, la influencia de la fuerza de la gravedad en la rigidez.

- 5 En las formas de realización, el factor de corrección se elige de forma proporcional a un seno del ángulo de bobinado de capa. Mediante un factor de corrección, determinado como el seno del ángulo de bobinado de capa, la proporción de tubos de bobinado que influyen en la rigidez de los haces de tubos se proyecta hacia la aceleración de gravedad, especialmente en caso de un apoyo horizontal del tubo central o de una disposición horizontal del eje de haz. En este sentido, mediante el factor de corrección se tiene en cuenta la proporción vectorial de la fuerza de la gravedad en el bobinado inclinado. La rigidez es en particular una rigidez a la flexión que depende del módulo de elasticidad del respectivo material del tubo de bobinado. Como materiales pueden utilizarse, por ejemplo, el aluminio o el acero fino. Sin embargo, también es posible imaginar otros materiales.
- 10 A este respecto, el procedimiento comprende un paso: cálculo de una rigidez a la flexión de una capa de bobinado de un haz de tubos utilizando un modelo de resistencia de un tubo de recambio de un material de tubo de bobinado, correspondiendo el tubo de recambio a una capa de bobinado, y ponderándose el tubo de recambio con una relación de superficie a partir de la superficie de sección transversal de tubo de bobinado con la superficie de sección transversal de celda, reduciendo un factor de corrección, que depende de un ángulo de bobinado, la rigidez a la flexión.
- 15 En las formas de realización, para la determinación de la rigidez de la capa de bobinado respectiva, la capa de bobinado se modela como un cilindro circular fabricado del material del tubo de bobinado. Además, gracias a la determinación de la relación de superficie, así como del factor de corrección se obtiene una formación del modelo realista. Es decir, especialmente en la fabricación de un termocambiador de haz tubular, la situación de apoyo y de rotación se puede ajustar de manera que no se produzcan tensiones excesivas en los materiales y que el intercambiador de calor se pueda fabricar de forma fiable.
- 20 En las formas de realización, el procedimiento comprende además una determinación de una rigidez del haz de tubos en una dirección axial de haz. En este caso se lleva a cabo una determinación de la rigidez a la flexión por medio de la cual se puede estimar la curvatura que se produce a lo largo de la dirección del eje de haz. A partir de la misma se puede derivar a su vez un análisis de tensión.
- 25 En las formas de realización, el procedimiento comprende al menos uno de los pasos:
- determinación de una rigidez del tubo central; y
 - determinación de una tensión que actúa sobre el tubo central en dependencia de una masa de los tubos de bobinado enrollados, de las capas de bobinado y de la rigidez determinada de las capas de bobinado.
- 30 Se puede decir que es posible realizar un análisis de tensión para el sistema de termocambiador de haz tubular a partir del tubo central y de las capas de bobinado, considerándose de forma fiable la carga del haz. En las formas de realización se lleva a cabo un análisis de tensión del haz de tubos con la ayuda de un procedimiento de elementos finitos. El tubo central, el haz de tubos y/o el termocambiador de haz tubular se disponen horizontalmente en dos puntos de apoyo.
- 35 Los procedimientos de elementos finitos permiten cálculos mecánicos estructurales de los estados de los sistemas mecánicos. Es posible imaginar, por ejemplo, el uso de paquetes de software comerciales para realizar los análisis de tensión en base a los procedimientos propuestos para determinar y estimar la rigidez.
- 40 En las formas de realización, las capas de bobinado se separan radialmente unas de otras con la ayuda de nervios de bobinado. Los nervios de bobinado de este tipo para la separación de las capas de bobinado también pueden considerarse en relación con su contribución a la resistencia del haz de tubos.
- 45 En las formas de realización, los tubos de bobinado se separan unos de otros por una distancia entre centros de tubo de bobinado en la dirección de un eje de tubo central o de un eje de haz. En el caso de la distancia entre centros de tubo de bobinado regular, también se puede hablar de una separación que determina la extensión de una celda periódica en la dirección axial.
- Además, cada tubo de bobinado puede tener un diámetro interior y un diámetro exterior. La superficie de la sección transversal de tubo de bobinado se determina a partir de $1/4 \times \pi \times$ la diferencia de los cuadrados de los diámetros interior y exterior.
- 50 En el procedimiento se determina especialmente la rigidez corregida del termocambiador de haz tubular, seleccionándose un factor de corrección medio para la determinación de la rigidez de todas las capas de bobinado. Por ejemplo, en virtud del ángulo de bobinado, se puede suponer que es el mismo para todas las capas, a fin de simplificar un cálculo o un análisis posterior. Alternativa o adicionalmente se puede utilizar también un factor de corrección como función trigonométrica del ángulo de bobinado para todas las capas del termocambiador de haz tubular.
- Una línea perimetral de la superficie de bobinado correspondiente para un tubo de bobinado y la dirección de bobinado correspondiente forman el ángulo de bobinado α .
- 55 En las formas de realización del procedimiento para la determinación de la rigidez, mediante el factor de corrección se reduce una rigidez determinada de la capa de bobinado respectiva en comparación con una rigidez de sustitución que se obtiene con la ayuda de la relación de superficie y de un modelo de rigidez que tiene en cuenta un cilindro circular. Es decir, gracias a la consideración de la influencia de la fuerza de la gravedad o a la consideración de sólo la parte de los tubos de bobinado que contribuye a la rigidez en relación con la dirección del eje de haz y/o con la

fuerza de la gravedad es posible una estimación o un cálculo más realista. Frente a modelos simples que no tienen en cuenta ningún factor de corrección, la invención proporciona rigideces más realistas y más reducidas, de manera que, durante la fabricación de termocambiadores de haz tubular, durante el transporte o en caso de condiciones de funcionamiento determinadas, se lleven a cabo un modelado o una simulación más realista.

5 Se propone además un procedimiento para la determinación de un estado de un termocambiador de haz tubular para el análisis de la vida útil. El termocambiador de haz tubular tiene un tubo central y tubos de bobinado enrollados alrededor del tubo central formando un haz de tubos, enrollándose los tubos de bobinado alrededor del tubo central en varias capas de bobinado y en un ángulo de bobinado de capa respectivo. Según la presente invención, la rigidez del termocambiador de haz tubular se determina con la ayuda de un procedimiento antes descrito o que se describe a continuación.

10 En este caso, teniendo en cuenta el factor de corrección se pueden determinar opcionalmente una magnitud, como una capacidad térmica específica, una conductividad térmica o un coeficiente de dilatación térmica de una capa de bobinado respectiva. Especialmente en caso de una estimación del factor de corrección a través del seno del ángulo de bobinado, resulta una proyección de la influencia de los tubos de bobinado en la magnitud respectiva a lo largo del eje de haz. Así, los análisis termomecánicos también se pueden realizar de forma más precisa y fiable.

15 En un procedimiento para la fabricación de un termocambiador de haz tubular, los tubos de bobinado se enrollan alrededor de un tubo central en varias capas de bobinado y en un ángulo de bobinado de capa respectivo. Según la presente invención, durante el enrollado se controla una rigidez del termocambiador de haz tubular con la ayuda de un procedimiento antes descrito o que se describe a continuación.

20 En los procedimientos propuestos, especialmente el ángulo de bobinado de capa no es insignificante, siendo del orden de entre 1° y 50°, preferiblemente de entre 3° y 10°. El número de capas de bobinado es, por ejemplo, de entre 2 y 200. Los diámetros exteriores de los tubos de bobinado son, por ejemplo, de entre 5 y 200 mm. El módulo de elasticidad del material del tubo de bobinado puede ser de entre 70.000 y 210.000 N/mm². Se propone además un producto de programa informático que inicia la ejecución del o de los procedimientos antes explicados en un dispositivo controlado por programa. Es posible imaginar, por ejemplo, una ejecución con la ayuda de un ordenador o de un ordenador de sala de control para una planta técnica de procedimientos.

25 Un producto de programa informático como, por ejemplo, un elemento de programa informático, puede ponerse a disposición o suministrarse como dispositivo de almacenamiento como, por ejemplo, una tarjeta de memoria, una memoria USB, un CD-ROM, un DVD, o también en forma de un archivo descargable desde un servidor en una red. En una red de comunicación inalámbrica, por ejemplo, esto puede llevarse a cabo mediante la transmisión de un archivo correspondiente con el producto de programa informático o con el elemento de programa informático.

30 El o los procedimientos se implementan especialmente mediante un software que en lo sucesivo también se considera sinónimo de software de simulación.

35 Otras configuraciones y aspectos ventajosos de la invención son objeto de las reivindicaciones dependientes, así como de los ejemplos de realización de la invención descritos a continuación. A continuación, la invención se explica más detalladamente por medio de formas de realización preferidas con referencia a las figuras adjuntas.

Figura 1 muestra esquemáticamente una forma de realización de un termocambiador de haz tubular en una sección transversal parcial.

40 Figura 2 muestra una representación esquemática de una superficie de bobinado para la explicación de un ángulo de bobinado de capa.

Figura 3 muestra esquemáticamente una forma de realización de un termocambiador de haz tubular en una sección transversal con respecto al eje longitudinal.

Figura 4 muestra una representación detallada de una capa de bobinado en la sección transversal.

45 Figura 5 muestra una forma de realización de un termocambiador de haz tubular, que se apoya horizontalmente, en una sección longitudinal.

Figura 6 muestra una secuencia esquemática de pasos del procedimiento para la determinación de la rigidez de un termocambiador de haz tubular.

Figura 7 y figura 8 muestran termocambiadores de haz tubular apoyados horizontalmente para la explicación de un procedimiento de fabricación.

50 En las figuras, los elementos idénticos o funcionalmente idénticos se dotan de las mismas referencias, a no ser que se indique lo contrario.

55 La figura 1 muestra un primer ejemplo de realización para un termocambiador de haz tubular 1. Los termocambiadores de haz tubular o los intercambiadores de calor enrollados en espiral comprenden haces de tubos enrollados en un tubo central en varias capas. También se habla de intercambiadores de calor enrollados en espiral en los que los tubos de bobinado se enrollan alrededor de un eje longitudinal o de un eje de haz z. En la figura 1 se indica una dirección de eje de haz z alrededor de la cual se extiende un tubo central 2. Los tubos de bobina 3 se enrollan en forma de espiral en el tubo central 2. En la representación de la figura 1 se muestra una sección del termocambiador de haz tubular resultante 1.

Una primera capa interna de bobinado 5 comprende tubos enrollados en espiral 3. Otra capa de bobinado 6 con más tubos de bobinado 3' sigue radialmente hacia el exterior. Es posible que los tubos de bobinado 3, 3' no sean directamente adyacentes, sino que estén separados radialmente por nervios. Aunque en la figura 1 sólo se indican dos capas de bobinado 5, 6, las formas de realización de los termocambiadores de haz tubular tienen hasta 100 capas.

En la orientación de la figura 1, el eje de haz z se desarrolla horizontalmente. Especialmente en la fabricación de los termocambiadores de haz tubular correspondientes 1, los tubos de bobinado 3, 3' se enrollan desde el interior hacia el exterior. Así se generan las múltiples capas de bobinado 5, 6. Durante el funcionamiento y el uso in situ, estos termocambiadores de haz tubular 1 se instalan normalmente en posición vertical. Es decir, los intercambiadores de calor están expuestos a cargas mecánicas especiales transversalmente con respecto a su dilatación axial sólo durante la fabricación y, por ejemplo, durante el transporte en un camión o tren de carga. Esto se debe en particular a las fuerzas que actúan sobre el tubo central 2 y las capas internas de bobinado 5 en virtud del peso de las capas de bobinado apoyadas 6. Los termocambiadores de haz tubular correspondientes pueden presentar un peso de 2 a 300 t con diámetros de varios metros. En la mayoría de los casos, como materiales para los tubos de bobinado se utilizan variantes de aluminio o de acero fino.

Para evitar dañar o cargar en exceso el haz de tubos 4 y el tubo central 2 durante la fabricación y el transporte, es conveniente determinar o estimar de antemano la resistencia o rigidez del sistema resultante del tubo central 2 y del haz de tubos 4. Con esta finalidad se pueden realizar simulaciones. Las investigaciones de la solicitante han demostrado que la influencia de los haces de tubos 5, 6 en la rigidez a lo largo del eje de haz z es de especial importancia y que sólo debe tenerse en cuenta la contribución vectorial con respecto a la aceleración de gravedad g que se indica en la figura 1.

En la figura 2 se representa esquemáticamente una superficie de bobinado 7 para explicar el ángulo de bobinado α . La superficie de bobinado 7 es la superficie de un cilindro circular imaginario con un eje longitudinal z en el que se enrolla el haz de tubos correspondiente 5 (compárese figura 1). En la figura 2 se indica un único tubo 3 con una dirección de bobinado W. La línea de puntos U corresponde a una línea perimetral de la superficie de bobinado 7. La figura 2 muestra una superficie de camisa desenrollada del cilindro correspondiente, es decir, los límites superior e inferior 7A coinciden en la superficie de camisa. El ángulo α , denominado ángulo de bobinado, está rodeado por la línea perimetral U y la dirección de bobinado W.

La estabilidad mecánica o la rigidez a lo largo de la dirección axial z, es decir, a lo largo del eje de haz, no están influenciadas por todo el material con su módulo de elasticidad, sino sólo por la proyección sobre el eje z. Para determinar en particular la rigidez a la flexión del sistema completo, no basta con considerar las capas de bobinado 5, 6, representadas en la figura 1, como tubos o cilindros. Más bien, las comprobaciones de la solicitante han demostrado que es necesario considerar un factor de corrección para llevar a cabo determinaciones realistas de la resistencia o rigidez.

En la figura 3 se puede ver una sección transversal esquemática con respecto al eje longitudinal z de un termocambiador de haz tubular, estando disponible el tubo central 2 en primer lugar radialmente del interior al exterior. En el mismo se enrollan una primera capa de bobinado 5 con tubos de bobinado, una segunda capa de bobinado 6, una tercera capa de bobinado 8 y una cuarta capa de bobinado exterior 9. Entre la primera y la segunda capa de bobinado se prevén nervios 10 para la separación radial. Del mismo modo se prevén otros nervios 11, 12 entre la segunda y la tercera capa de bobinado 6, 8 y entre la tercera capa de bobinado 8 y la cuarta capa de bobinado exterior 9.

En el pasado, las rigideces del termocambiador de haz tubular resultante 1 se determinaba con la ayuda de cilindros de recambio en forma de capas de bobinado 5, 6, 8, 9 con una ponderación de la relación de superficie de los tubos de bobinado con respecto a las celdas periódicas. Esto no siempre ha demostrado ser fiable, por lo que para la consideración de la fuerza de la gravedad que actúa sobre los tubos de bobinado se propone un factor de corrección, en especial para la determinación de la relación de superficie.

La figura 4 muestra una vista detallada de una capa de bobinado 5. La figura representa una sección transversal a través de los tubos de bobinado 3. En la figura 4, el eje horizontal se desarrolla a lo largo de la dirección del eje de haz z, indicándose hacia arriba la distancia radial r. Se puede ver la sección transversal del tubo central 2 en el que se enrolla una primera capa de bobinado 5 con tubos de bobinado 3. Los tubos de bobinado 3 tienen los respectivos puntos centrales M y una superficie de sección transversal circular con respectivamente un radio interior r_i y un radio exterior r_a . Como se indica a la izquierda en la figura 4, resultan un diámetro interior d_i y un diámetro exterior d_a . En este caso, la dilatación radial de la capa de bobinado 5 corresponde al diámetro exterior d_a . También se puede ver que los puntos centrales M están separados unos de otros regularmente a una distancia axial T. Por este motivo, es posible definir una celda periódica 13 que resulta de las distancias entre los centros del tubo de bobinado T. La celda se ilustra con una línea de puntos y rayas con el número de referencia 13. Radialmente hacia el exterior sigue un nervio de bobinado 10 que se puede modelar, por ejemplo, como un cilindro.

A fin de estimar un análisis de resistencia o una rigidez del termocambiador de haz tubular resultante, tiene lugar una consideración de la relación de superficie de la superficie A_p de la celda de unidad 13 con la superficie de sección transversal de tubo de bobinado A_r resultante. La superficie de sección transversal de tubo de bobinado A_r puede determinarse como $A_r = 1/4 \times \pi \times (d_a^2 - d_i^2)$.

La superficie de sección transversal de la celda A_p es $A_p = T \times d_a$. La relación A_p/A_r es un parámetro fundamental para la determinación de la rigidez de la capa de bobinado 5. Además, también se tiene en cuenta el ángulo de bobinado α no mostrado en la figura 4. La solicitante ha comprobado que la relación de superficie A_p/A_r por sí sola conduce a unos valores de rigidez superiores a los reales. Por consiguiente, se produce una proyección de la parte de los tubos de bobinado de una capa de bobinado sobre el eje longitudinal. De este modo resulta un factor de corrección $\sin \alpha < 1$, obteniéndose en los cálculos adicionales de la rigidez o de la rigidez a la flexión un resultado realista. Especialmente durante la fabricación o el transporte de termocambiadores de haz tubular se puede tener mejor en cuenta la carga del tubo central bajo la influencia del haz tubular y de un apoyo.

La relación de superficie propuesta A_p/A_r con un factor de corrección $\sin \alpha$ puede tenerse en cuenta en otros análisis de tensión numéricos, por ejemplo, con la ayuda de métodos de elementos finitos. Además se tienen en cuenta otros parámetros de material como el módulo de elasticidad del material de tubo angular correspondiente. En los ejemplos de realización, la separación o la extensión axial de la celda es de 18 mm, y los tubos de bobinado tienen un diámetro exterior de 15 mm. Así resulta una superficie de sección transversal de celda $A_p = 270 \text{ mm}^2$. En caso de un diámetro interior del tubo de bobinado de 14,1 mm, se obtiene una superficie de sección transversal de tubo de 20,57 mm^2 . Un ángulo de bobinado es, por ejemplo, de 5° , por lo que el factor de corrección \sin es de 5° .

La figura 5 muestra otro ejemplo de realización 5 para un termocambiador de haz tubular durante la fabricación. Durante la fabricación, un bobinado respectivo 5, 6, 8, 9 se enrolla por capas en un tubo central 2 apoyado en dos puntos de apoyo 15 y 16 sobre el apoyo 14. En este caso, el haz de tubos resultante 4 gira alrededor del eje z o del eje de haz z. Se pueden enrollar hasta 100 capas. Especialmente en este apoyo horizontal, la fuerza de la gravedad g presiona sobre el tubo central 2. Como ya se ha indicado anteriormente, se deduce una rigidez para la capa de bobinado respectiva 5, 6, 8, 9 a partir de una relación de superficie A_p/A_r y del factor de corrección para la consideración de la proporción de la resistencia de los tubos de bobinado contra la fuerza de la gravedad g y de un módulo de elasticidad del material del tubo de bobinado. Por ejemplo, el material del tubo puede tener un módulo de elasticidad de 190.000 N/mm^2 . A partir de aquí se puede estimar la rigidez a la flexión y se pueden llevar a cabo otros procedimientos, por ejemplo, un procedimiento de elementos finitos.

En la figura 6 se representa a modo de ejemplo un procedimiento para la determinación de la rigidez de un termocambiador de haz tubular, como el que se indica en las otras figuras. En un primer paso del proceso S1 se crea un modelo, por ejemplo, se llevan a cabo la simulación o el modelado de una capa de bobinado mediante un cilindro circular de recambio. En el paso S2, este modelo básico se mejora con el factor de corrección correspondiente. Para ello, el parámetro de resistencia geométrico para la capa de bobinado correspondiente se determina a partir de la relación de superficie A_p/A_r y del factor de corrección en dependencia del ángulo de bobinado, por ejemplo, $\sin \alpha$. Finalmente, en el paso S3, se realiza, por ejemplo, con la ayuda de un paquete de software comercial, un cálculo de elementos finitos para determinar la rigidez de todo el sistema de termocambiador de haz tubular con el tubo central y el haz. El resultado del cálculo de la rigidez se puede utilizar en un análisis de la vida útil, por ejemplo, para determinar las tensiones en el termocambiador de haz tubular. Esto se indica mediante el paso opcional S4.

Por ejemplo, la rigidez también puede determinarse de forma continua durante el enrollado de los tubos de bobinado y, de este modo, adaptar parámetros de fabricación tales como las velocidades de bobinado o los ángulos de bobinado. Esto se indica en la figura 6 con la flecha discontinua de retorno en relación con el paso S4.

Las figuras 7 y 8 muestran esquemáticamente los resultados del cálculo mecánico estructural en base a las rigideces determinadas de las capas de bobinado. Aquí, la figura 7 muestra a su vez un haz de tubos apoyado que se enrolla en un tubo central 2. Como se indica en la representación detallada de la figura 7, el haz de tubos 19 tiene varias capas de bobinado 3, 3' que se enrollan en el tubo central 2 y que están separadas radialmente por los nervios de bobinado 10, 11. En la orientación de la figura 7, el eje de haz z se desarrolla horizontalmente y el tubo central 6 está dotado de una placa de apoyo 17 y de un distanciador 18 para el haz de tubos 19 en el tubo central 2. La figura 7 muestra la orientación del eje longitudinal z durante la fabricación o durante el transporte en dos puntos de apoyo 15, 16. En aplicaciones posteriores, el eje se gira verticalmente, de manera que la placa de apoyo 17, junto con el distanciador, apoya y soporta el haz de tubos 19.

Durante la fabricación se ejercen fuerzas especiales sobre el tubo central 2 y el haz de tubos 19' entre los puntos de apoyo 15, 16 debido al peso del haz de tubos 19. Esto se indica en la figura 8. Debido a la rigidez a la flexión resultante del haz de tubos, identificado en la figura 8 con el número de referencia 19' y que comprende otras capas de bobinado, resulta una curvatura o un cierto combado entre los puntos de apoyo 15, 16. Debido a la determinación de las rigideces de las capas de bobinado en el haz de tubos 19, 19', ahora es posible determinar la tensión en el sistema, por ejemplo, con la ayuda de un procedimiento de cálculo de elementos finitos. De aquí resulta, como demuestran las investigaciones de la solicitante, una sollicitación de tensión especial del sistema mecánico del termocambiador de haz tubular en determinadas zonas.

Debido a la simulación y la estimación o el cálculo de las resistencias y rigideces, estos análisis de tensión numéricos pueden llevarse a cabo de forma fiable durante el procesamiento y la fabricación, así como durante el transporte. Lo mismo se aplica a un transporte, por ejemplo, en un camión, donde los termocambiadores de haz tubular se apoyan horizontalmente. Además resulta la posibilidad de corregir otros parámetros de simulación con la ayuda de factores de corrección análogos que simulan una proyección en dirección axial. Es posible imaginar, por ejemplo, que la conductividad térmica a lo largo del eje de haz z o los coeficientes de dilatación térmica se asuman

de forma realista. De este modo, el análisis termomecánico del termocambiador de haz tubular es más sencillo y fiable.

Aunque la presente invención se ha explicado más detalladamente por medio de ejemplos de realización, ésta se puede modificar de muchas maneras. Las dimensiones y el número de bobinados indicados sólo deben entenderse a modo de ejemplo. Además, más allá del parámetro de resistencia geométrico y del factor de corrección para la consideración de la fuerza de la gravedad, el modelado numérico se puede mejorar aún más. Además, la determinación de la rigidez bajo la influencia de la fuerza de la gravedad también puede llevarse a cabo en caso de termocambiadores de haz tubular dispuestos verticalmente, a pesar de que en los ejemplos de realización representados se parte, en la mayoría de los casos, de una situación horizontal. Especialmente durante el funcionamiento del termocambiador de haz tubular respectivo (después de su fabricación y transporte al lugar de uso), el eje del tubo central se desarrolla verticalmente. En este caso, los procedimientos arriba mencionados con una consideración vectorial de la fuerza de la gravedad y la disposición, así como del desarrollo de los tubos de bobinado en relación con la aceleración de gravedad, sirven para una determinación fiable de la resistencia y la rigidez.

15 Lista de referencias

	α	Ángulo de bobinado
	A_r	Superficie de sección transversal de tubo de bobinado
	A_p	Superficie de sección transversal de celda
	d_i	Diámetro interior de un tubo de bobinado
20	d_a	Diámetro exterior de un tubo de bobinado
	g	Aceleración de gravedad
	r	Dirección radial
	T	Distancia/Separación del punto central del tubo de bobinado
	U	Línea perimetral
25	W	Dirección de bobinado
	z	Eje de haz/Dirección axial
	1	Termocambiador de haz tubular
	2	Tubo central
	3	Tubo de bobinado
30	4	Haz de tubos
	5, 6	Capa de bobinado
	7	Superficie de bobinado
	7A	Línea de borde
	8, 9	Capa de bobinado
35	10, 11, 12	Nervios
	13	Celda
	14	Apoyo
	15, 16	Puntos de apoyo
	17	Placas de apoyo
40	18	Distanciador
	19	Haz de tubos
	S1	Formación de modelo
	S2	Determinación de parámetros de corrección
	S3	Cálculo de elementos finitos
45	S4	Bobinado y adaptación de modelo

REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento para la determinación de una rigidez de un termocambiador de haz tubular (1) que comprende un tubo central (2) y tubos de bobinado (3) enrollados alrededor del tubo central (2) formando un haz de tubos, enrollándose los tubos de bobinado (3) alrededor del tubo central (2) en varias capas de bobinado (5, 6) y con un ángulo de bobinado de capa respectivo (α), con los pasos:
- determinación de un parámetro de resistencia geométrico de una capa de bobinado respectiva (5), comprendiendo el parámetro de resistencia geométrico una relación de superficie de una superficie de sección transversal de tubo de bobinado (A_r) con una superficie de sección transversal de celda (A_p), resultando la superficie de sección transversal de celda (A_p) de la distancia axial (T) entre los tubos de bobinado (3) y un diámetro exterior (d_a) de los tubos de bobinado (3);
 - corrección de la relación de superficie en un factor de corrección para la consideración de la orientación de los tubos de bobinado (3) de la respectiva capa de bobinado en relación con la fuerza de la gravedad (F_g) que actúa sobre los tubos de bobinado; y
 - 10 - determinación de la rigidez de la capa de bobinado correspondiente (5) en dependencia de la relación de superficie corregida y del módulo de elasticidad del material del tubo de bobinado.
- 20 2. Procedimiento según la reivindicación 1, eligiéndose el factor de corrección proporcionalmente a un seno del ángulo de bobinado de capas (α).
3. Procedimiento según la reivindicación 1 o 2, modelándose la capa de bobinado (5) para la determinación de la rigidez de la capa de bobinado respectiva (5) como un cilindro circular fabricado del material del tubo de bobinado.
- 25 4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 - 3 que comprende además:
- determinación de una rigidez del haz de tubos (4) en una dirección de eje de haz (z).
5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 - 4 que comprende además:
- determinación de una rigidez del tubo central (2); y
 - determinación de una tensión que actúa sobre el tubo central (2) en dependencia de una masa de los tubos de bobinado enrollados (3), de las capas de bobinado (5, 6) y de la rigidez determinada de las capas de bobinado (5, 6).
- 30 6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 - 5 que comprende además:
- realización de un análisis de tensión del haz de tubos (4) con la ayuda de un procedimiento de elementos finitos, disponiéndose el tubo central (2), el haz de tubos (4) y/o el termocambiador de haz tubular (1) horizontalmente en dos puntos de apoyo (15, 16).
- 35 7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 - 6, separándose radialmente las capas de bobinado (5, 6) unas de otras con la ayuda de nervios de bobinado (10, 11, 12).
- 40 8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 - 7, separándose los tubos de bobinado (3) unos de otros en la dirección de un eje de tubo central (z) en una distancia entre centros de tubo de bobinado (T).
9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 - 8, presentando un tubo de bobinado respectivo (3) un diámetro interior d_i y un diámetro exterior d_a y determinándose la superficie de sección transversal de tubo de bobinado A_r como: $A_r = 0,25 \times (d_a^2 - d_i^2) \times \pi$.
- 45 10. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 - 9, determinándose una rigidez corregida del termocambiador de haz tubular (1) mediante la elección de un factor de corrección medio para la determinación de las rigideces de todas las capas de bobinado (5, 6, 8, 9).
- 50 11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 - 10, formando una línea perimetral (U) de la respectiva superficie de bobinado (7) para un tubo de bobinado (3) y la respectiva dirección de bobinado (W), el ángulo de bobinado (α).
- 55 12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 - 11, reduciéndose mediante el factor de corrección una rigidez determinada de la capa de bobinado respectiva (5, 6) en comparación con una rigidez de sustitución que se obtiene con la ayuda de la relación de superficie y de un modelo de rigidez que tiene en cuenta un cilindro circular.
- 60 13. Procedimiento para la determinación de un estado de un termocambiador de haz tubular (1) para el análisis de la vida útil que comprende un tubo central (2) y tubos de bobinado (3) enrollados alrededor del tubo central (2) formando un haz de tubos (4), enrollándose los tubos de bobinado (3) alrededor del tubo central (2) en varias capas de bobinado (5, 6) y con un ángulo de bobinado de capa respectivo (α), determinándose una rigidez del termocambiador de haz tubular (1) con la ayuda de un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 - 12.

14. Procedimiento según la reivindicación 13, determinándose además una capacidad térmica específica, una conductividad térmica y/o un coeficiente de dilatación térmica de una capa de bobinado respectiva (5, 6) teniendo en cuenta el factor de corrección.
- 5 15. Procedimiento para la fabricación de un termocambiador de haz tubular (1) en el que los tubos de bobinado (3) se enrollan en varias capas de bobinado (5, 6) y con un ángulo de bobinado de capa respectivo (α) alrededor del tubo central (2), controlándose durante el bobinado una rigidez del termocambiador de haz tubular (1) con la ayuda de un procedimiento según una de las reivindicaciones 1 - 12.

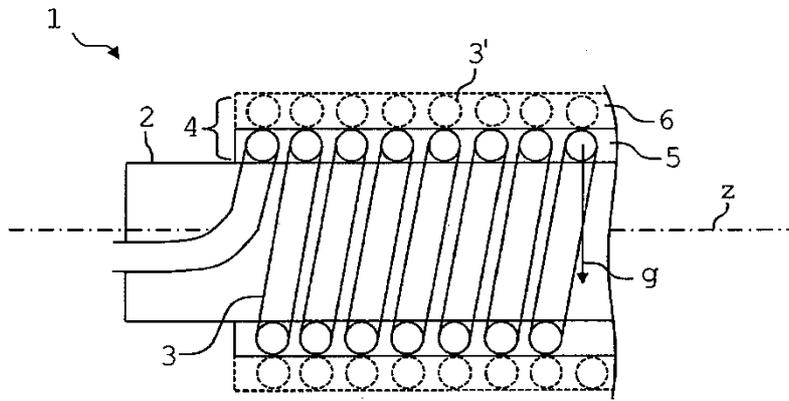


Fig. 1

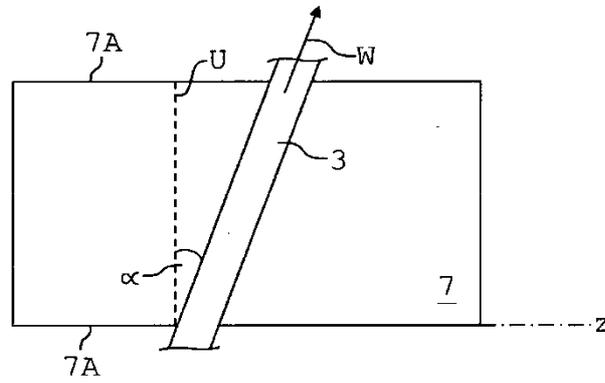


Fig. 2

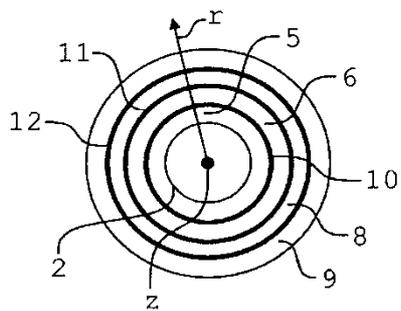


Fig. 3

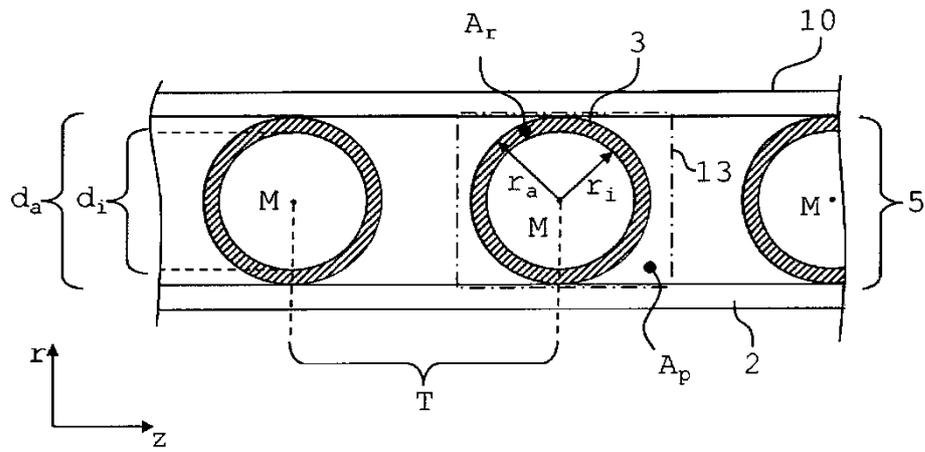


Fig. 4

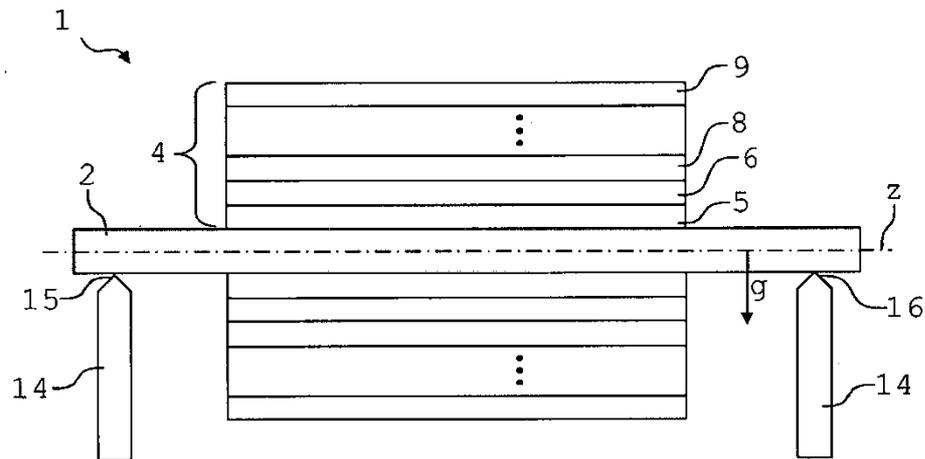


Fig. 5

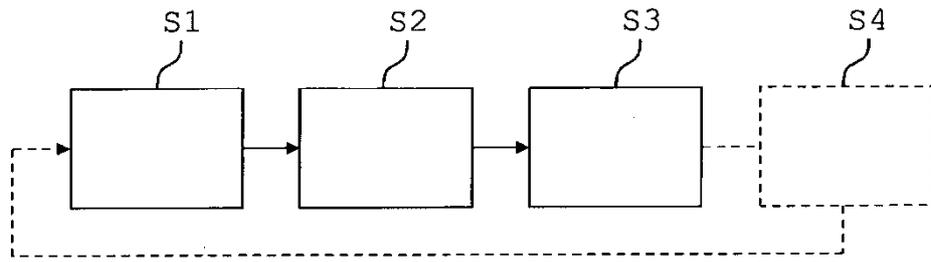


Fig. 6

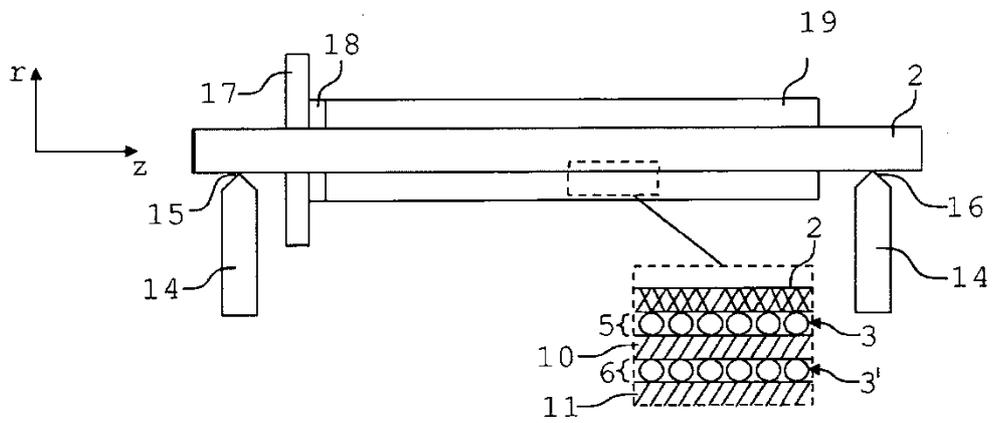


Fig. 7

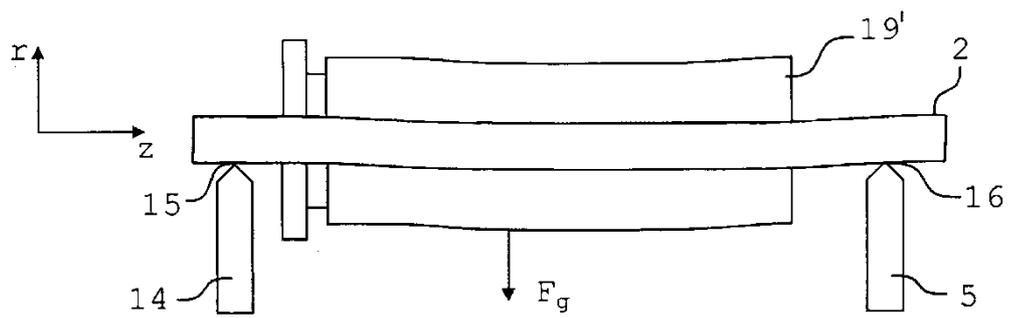


Fig. 8