



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 356 611**

51 Int. Cl.:  
**H01B 12/12** (2006.01)  
**H01B 12/10** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **05739762 .2**  
96 Fecha de presentación : **22.04.2005**  
97 Número de publicación de la solicitud: **1738376**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **03.01.2007**

54 Título: **Cable superconductor y procedimiento para su producción.**

30 Prioridad: **23.04.2004 EP 04009730**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**11.04.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**11.04.2011**

73 Titular/es: **GSI Helmholtzzentrum für  
Schwerionenforschung GmbH  
Planckstrasse 1  
64291 Darmstadt, DE**

72 Inventor/es: **Fischer, Egbert;  
Khodghibagiyan, Hamlet;  
Kovalenko, Alexander y  
Moritz, Gebhard**

74 Agente: **Lehmann Novo, María Isabel**

ES 2 356 611 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

**Cable superconductor y procedimiento para su producción**

5 **[0001]** La invención se refiere a un cable hueco superconductor con un tubo exterior, que presenta una sección transversal interior de forma circular y, por lo tanto una pared interior cilíndrica. Además, el cable hueco superconductor tiene un canal de refrigeración central con sección transversal de forma circular, que es menor que la sección transversal interior del tubo exterior. Entre la pared interior del tubo exterior y el canal de refrigeración están dispuestos alambres superconductores perfilados. Tales alambres superconductores perfilados presentan al menos un superconductor (filamento superconductor) y tienen un perfil de la sección transversal de una dovola o bien Keystone, como se conoce para puentes de piedra romanos o para bóveda de crucería.

15 **[0002]** Se conocen claves superconductores perfilados con un perfil de la sección transversal de una dovola a partir de la publicación US 6.675.623 B2. Además, el documento US 2003/0024 730 es el estado de la técnica. Los cables superconductores en forma de dovola conocidos están constituidos por alambres superconductores, retorcidos entre sí, con sección transversal redonda y han obtenido una forma trapezoidal después de la torsión con la ayuda de cilindros perfiladores.

20 **[0003]** La estructura de un cable hueco superconductor del tipo Nuklotron con alambres superconductores redondos (variante estándar, figura 16) o alambres superconductores perfilados (cable Nuklotron mejorado, figura 17) se conoce a partir de la publicación "Design and test of new hollow high current NbTi cable for fast ramped synchrotron magnets" Proc. EUCAS 2003, Sorrento, Septiembre de 2003, H. Khodzhbagiyani y col. En el cable hueco conocido se forma en primer lugar un canal de refrigeración, preparando un tubo interior metálico compacto de CuNi. Sobre su envolvente exterior están colocados o bien arrollados alambres superconductores perfilados en dirección longitudinal con una sección transversal en forma de dovola. Para fijar los alambres superconductores sobre el tubo interior compacto, están arrollados unos alambres de NiCr en el exterior alrededor de los alambres superconductores radialmente o bien en forma helicoidal. Una cinta de Kapton, que está arrollada sobre los alambres de NiCr, forma una envolvente exterior de protección. Una cinta de fibras de vidrio arrollada sobre la envolvente exterior se ocupa del aislamiento eléctrico del cable hueco superconductor.

30 **[0004]** Un cable hueco superconductor constituido de esta manera tiene, entre otras, la ventaja de poder compensar cargas dinámicas altas, como aparecen a través de las fuerzas de Lorentz en imanes de impulsos rápidos y campos magnéticos altos. Las fuentes de calor provocadas por estos campos alternos a través de corrientes parásitas, ciclos de histéresis, campos de tensión mecánica y otras influencias exteriores (por ejemplo haces de iones) pueden ser refrigeradas de manera muy efectiva en el funcionamiento continuo a través del canal de refrigeración interno debido al tubo interior compacto. La sección transversal relativamente grande del tubo interior compacto con superficie lisa posibilita un caudal alto de refrigerante con una resistencia de fricción reducida y, por lo tanto, con caídas reducidas de la presión en la corriente de helio de dos fases. Además, todos los alambres superconductores están dispuestos absolutamente simétricos y, por lo tanto, en condiciones de funcionamiento idénticas, con lo que se impide en la mayor medida posible una degradación de la corriente crítica del cable con carga electromagnética creciente.

40 **[0005]** Esta disposición de los alambres superconductores conduce, además, a una inductividad reducida del cable y, por lo tanto (entre otras cosas) también a una reducción de la energía acumulada.

45 **[0006]** Otro tipo de cable se prefiere, en general, cuando el sistema de bobinas a crear no debe activarse en régimen de impulsos extremadamente rápidos, pero para ello debe acumularse una energía de alta inductividad, que debe cederse en impulsos térmicos altos y estocásticos de corta duración. En este caso, una potencia de refrigeración continua alta es secundaria, mientras que se pretende principalmente la transmisión de calor lo más rápida posible en el intervalo de milisegundos a la capacidad térmica del helio que refrigera los alambres superconductores. Para este cometido han sido desarrollados los cables huecos conocidos del tipo CICC, como se muestra en la figura 14.

50 **[0007]** No obstante, puesto que en la aplicación práctica estos cables deben dominar cada vez más también cargas mecánicas y térmicas más elevadas, su desarrollo ha conducido a un cable de alta corriente del tipo CICC que dispone, a través de elementos de construcción adicionales y una refrigeración complicada, de dos circuitos de refrigeración en principio diferentes con helio supercrítico en el circuito de refrigeración exterior y con helio de dos fases en el canal de refrigeración central.

55 **[0008]** Esta estructura complicada no sólo tiene inconvenientes tecnológicos y, por lo tanto, relevantes de costes, sino condicionada automáticamente una densidad de corriente media reducida. Un cable de este tipo de acuerdo con el estado actual de la técnica se representa en la figura 15 y se conoce como cable POLO (ver, por ejemplo, "CHATS", FzK, Karlsruhe, Septiembre de 2002, L. Bottura y col.), Representa el prototipo para la invención explicada a continuación.

**[0009]** El cometido de la invención es superar los inconvenientes del estado de la técnica e indicar un cable hueco superconductor, que posibilita una refrigeración intensiva de los componentes superconductores y, además, proporciona una alta densidad de corriente para un cable hueco del tipo CICC con una estructura compacta y mecánicamente estable del cable hueco. Deben indicarse soluciones para superar en la mayor medida posible los inconvenientes del cable CICC frente al cable del tipo Nuklotron y para hacer posibles las ventajas de los dos tipos de cables huecos en un cable hueco superconductor nuevo.

**[0010]** Este cometido se soluciona con el objeto de las reivindicaciones independientes. Los desarrollos ventajosos se deducen a partir de las reivindicaciones dependientes.

**[0011]** De acuerdo con la invención, se crea un cable hueco, que presenta un tubo exterior con una sección transversal interior de forma circular y pared interior cilíndrica. En el centro del cable hueco superconductor está dispuesto un canal de refrigeración central con sección transversal poligonal o cilíndrica, que es menor que la sección transversal interior del tubo exterior. Entre la pared interior y el canal de refrigeración están dispuestos alambres superconductores perfilados. Estos alambres superconductores perfilados presentan al menos un filamento superconductor (habitualmente en una matriz de Cu). Además, los alambres superconductores tienen un perfil de la sección transversal de una dovola o bien Keystone.

**[0012]** El perfil de la sección transversal de los alambres superconductores perfilados presenta una sección de curvatura exterior, que está adaptada a la sección transversal interior de forma circular de tubo exterior. Además, la sección transversal de los alambres superconductores perfilados presenta una sección de curvatura interior, que está adaptada de nuevo a la sección transversal de forma circular del canal de refrigeración. Por último, el perfil de la sección transversal posee cantos laterales, que están alineados perfilados sobre el punto medio del canal de refrigeración. En este caso, los alambres superconductores perfilados están dispuestos sobre la pared interior del tubo exterior y forman con sus secciones interiores el canal de refrigeración del cable hueco superconductor.

**[0013]** En resumen, hay que establecer que el cable superconductor presenta tres elementos principales, que presentan las siguientes ventajas. Por una parte, los filamentos superconductores están reducidos al mínimo, con lo que se reducen el efecto de Meissner y las pérdidas de corriente alterna. En segundo lugar, se incrusta una cantidad lo más grande posible de filamentos en una matriz metálica, que estabiliza mecánicamente los filamentos y garantiza una alta conducción de calor. En tercer lugar, en el cable superconductor se combinan y se estabilizan mecánicamente una pluralidad de alambres superconductores y se establece el contacto con el refrigerante. Los alambres superconductores de acuerdo con la invención, aislados eléctricamente unos de los otros, forman con la barrera de la resistencia el material bruto para la producción de elementos de bobinas concretos. Puesto que los alambres no están fundidos entre sí, las bobinas y/o los cables son extraordinariamente flexibles.

**[0014]** Un cable hueco superconductor de acuerdo con la invención de este tipo tiene, entre otras, las siguientes ventajas:

los alambres superconductores perfilados están dispuestos tan estrechamente entre sí y están adaptados a la pared interior del tubo exterior de tal forma que sin el tubo interior conocido a partir del estado de la técnica se pueden mantener en posición en unión positiva y en unión por aplicación de fuerza y dan como resultado un cuerpo cilíndrico, cuyo espacio interior forma el canal de refrigeración. Es decir, que no se necesitan ya elementos de construcción interiores para la fijación mecánica de los alambres superconductores. Además del ahorro de material a través de la omisión de un componente, este cable hueco superconductor tiene, además, la ventaja, de que a través de la sección transversal incrementada del canal de refrigeración se reduce la resistencia a la circulación del refrigerante. De esta manera, se consigue un efecto más elevado. De manera alternativa, este volumen libre adicional se puede utilizar también para alambres superconductores mayores y, por lo tanto, para una densidad de corriente media más elevada. Por último, el refrigerante o bien el canal de refrigeración está en contacto directo con los alambres superconductores perfilados. Este contacto existe, en efecto, también en los cables CICC descritos anteriormente, pero la resistencia a la circulación en los hilos de refrigeración dispuestos allí es considerable, la capacidad térmica de la cantidad reducida de helio supercrítico es limitada, de manera que los efectos de refrigeración alcanzables con el cable hueco de acuerdo con la invención se incrementan claramente en todos los intervalos de tiempo (impulsos térmicos cortos y carga duradera). La disposición simétrica de todos los alambres superconductores garantiza una estabilidad adicional del cable total contra impulsos térmicos, como se ha descrito anteriormente para el cable Nuklotron. Desde el punto de vista criotécnico, la refrigeración simplificada ahora drásticamente en comparación con el prototipo representa una ventaja decisiva, puesto que con ello no se necesitan ya dos circuitos de refrigeración, sobre todo también todavía cualitativamente diferentes, y se mejoran los conductos de refrigeración en órdenes de magnitud en todas las escalas de tiempo (potencias de los impulsos hasta potencia duradera constante).

**[0015]** Los alambres superconductores perfilados están dispuestos sobre la pared interior del tubo exterior del cable hueco superconductor con sus secciones de curvatura exterior y sus cantos laterales alineados entre sí en contacto mutuo tan hermético que, a todas las temperaturas de funcionamiento del cable hueco superconductor, mantienen un canal de refrigeración central con sus secciones de curvatura interior. Puesto que un cable hueco superconductor de este tipo recorre en su funcionamiento diferencias extremas de temperatura desde temperatura ambiente hasta algunos grados Kelvin, a través de la estructura hermética de los alambres superconductores perfilados en forma de dovela se consigue que, a pesar de las diferentes temperaturas de funcionamiento, se mantenga el canal de refrigeración central. A tal fin, la suma de las anchuras de los intersticios, que se forman posiblemente durante el funcionamiento entre las superconductores perfilados, es a todas las temperaturas de funcionamiento del cable hueco superconductor menor que la diferencia de las longitudes  $\Delta l$  entre la sección de curvatura exterior y la sección de curvatura interior de un superconductor perfilado individual. En este caso es

$$\Delta l = 2\pi(r_a - r_i)/n$$

en la que  $n$  es el número de los superconductores perfilados distribuidos sobre la pared interior del tubo exterior,  $r_a$  es el radio interior del tubo exterior y  $r_i$  es el radio interior del canal de circulación. Puesto que la longitud  $l_{ak}$  de un radio de curvatura exterior es

$$l_{ak} = 2\pi r_a/n$$

y la longitud  $l_{ik}$  de la sección de curvatura interior de un superconductor perfilado es

$$l_{ik} = 2\pi r_i/n$$

deben cumplirse a todas las temperaturas de funcionamiento del cable hueco superconductor las siguientes condiciones:

$$n \cdot s < \Delta l$$

o

$$n \cdot s < l_{ak} - l_{ik}$$

y, por lo tanto, debe garantizarse la condición

$$s < 2\pi(r_a - r_i)/n^2$$

para que se mantenga el canal de refrigeración central. De acuerdo con ello, el número de los alambres superconductores perfilados depende de la tolerancia de fabricación y debe mantenerse, dado el caso, lo más reducido posible para poder permitir, en el caso de tolerancias grandes, la anchura del intersticio  $s$  resultante. En general, para la reducción de la influencia de las corrientes parásitas, las dos medidas principales de la sección transversal de los alambres superconductores perfilados no deben desviarse demasiado una de la otra. La producción de calor tampoco deseable en virtud de los campos de tensión y de deformación mecánicas se puede reducir al mínimo a través de fabricación en unión positiva, dado el caso bajo tensión previa.

**[0016]** En otra forma de realización de la invención, los alambres superconductores perfilados presentan cantos laterales perfilados que engranan entre sí. Aunque las consideraciones anteriores están previstas y están derivadas para la formación de un canal de refrigeración central a partir de superconductores perfilados con cantos laterales de la sección transversal de los superconductores perfilados que terminan en el centro del cable hueco, con esta otra forma de realización de la invención, en la que también se perfilan los cantos laterales y no se extienden linealmente con respecto al punto central, se da otra posibilidad para elevar la seguridad para el mantenimiento del canal de refrigeración central, puesto que adicionalmente a la diferencia de longitud  $\Delta l$  mencionada anteriormente para la suma  $s \cdot n$  de todas las anchuras de los intersticios  $s$ , se añade todavía el desplazamiento a través de los cantos laterales perfilados. A través de este desplazamiento con una magnitud  $v$  resulta como condición para la anchura admisible del intersticio  $s$  el valor

$$s < (\Delta l + v)/n.$$

**[0017]** Con las figuras 2 y 4 adjuntas se representan dos formas de realización de superconductores perfilados con cantos laterales perfilados y con el desplazamiento respectivo de la magnitud  $v$ .

**[0018]** En otra forma de realización de la invención, el tubo exterior es de dos capas. Una primera capa presenta uno o varios alambres tensores arrollados en forma de espiral alrededor de un haz de alambres superconductores perfilados. Una segunda capa presenta una capa exterior aislante de electricidad y cerrada herméticamente. Esta solución de alambre tensor tiene la ventaja de que se pueden fabricar de forma continua cables huecos superconductores de longitud discrecional.

**[0019]** En otra forma de realización de la invención, los alambres superconductores perfilados presentan filamentos superconductores trenzados con cables o retorcidos. Ejemplos de realización de tales alambres superconductores perfilados se representan en las otras figuras 6, 7 así como 8 y se explican en detalle a continuación. Los filamentos superconductores están provistos con un núcleo metálico dúctil y una envolvente metálica dúctil, de manera que los alambres superconductores son accesibles a una conformación perfiladora. A tal fin, los alambres superconductores perfilados presentan una matriz metálica (con un núcleo metálico o alma metálica, habitualmente de Cu) y para la reducción de las corrientes parásitas, presentan, dado el caso, capas intermedias adicionales de alta resistencia, por ejemplo de aleaciones de CuNi. Los filamentos superconductores están constituidos, por ejemplo, de alambres de NbTi, que están retorcidos o trenzados con cables entre sí. La envolvente presenta de la misma manera con preferencia una aleación de CuNi.

**[0020]** En otra forma de realización de la invención, los alambres superconductores perfilados son superconductores cerámicos o de alta temperatura. Tales HTSL tienen la ventaja de que su temperatura crítica es esencialmente más alta que en los superconductores metálicos. La temperatura crítica en los superconductores metálicos está por debajo de 20 grados Kelvin. En los HTSL, las temperaturas críticas están, en parte, por encima de 80 grados Kelvin, con lo va unida la ventaja de que se pueden emplear refrigerantes esencialmente más económicos p se pueden realizar campos magnéticos más elevados temperaturas más bajas. Aunque la conversión de HTSL en alambres superconductores perfilados es más difícil, sin embargo se puede considerar que los llamados superconductores cerámicos a base de YBCO se pueden procesar sobre la base de  $Y_3O_3$ ,  $BaCO_3$  y CuO con mezclas de óxido de plata, óxido de platino u óxido de cerio, en general, a través de procesos de fundición y de recocido correspondientes para obtener los alambres superconductores perfilados. Aunque los llamados superconductores BSCCO, que están constituidos por óxidos de bismuto, de estroncio, de calcio y de cobre y que pueden contener adiciones de óxidos de plomo, presentan hasta 90 % de material superconductor ortorrómbico, se pueden procesar para obtener alambres superconductores perfilados.

**[0021]** El tubo exterior del cable hueco superconductor está constituido a partir de un material metálico o no metálico, como una aleación de CuNi, acero noble, plástico reforzado con fibra de vidrio (GFK) o material orgánico y puede presentar un contorno exterior de forma circular, cuadrada o trapezoidal, u otra forma discrecional necesaria. El tubo exterior respectivo puede ser arrollado con cintas correspondientes de Kapton y/o con cintas de fibras de vidrio para el aislamiento eléctrico. El contorno exterior cuadrado tiene la ventaja de que dentro del tubo exterior se pueden incorporar canales de refrigeración en la dirección longitudinal, de manera que los alambres superconductores perfilados en forma de dovola no sólo son refrigerados a través del canal de refrigeración central, que está en contacto directo con los superconductores, sino que se pueden refrigerar adicionalmente también todavía a través del tubo exterior o bien por medio de canales de refrigeración que conducen a través del tubo exterior en la dirección longitudinal. Lo mismo se aplica también para contornos exteriores de forma trapezoidal, puesto que también aquí se pueden prever, por ejemplo, cuatro canales de refrigeración adicionales directamente en el material de tubo exterior.

**[0022]** Los canales de refrigeración exteriores pueden estar abiertos a lo largo de la pared interior del tubo exterior sobre la anchura finita –  $l_{ak}$ .

**[0023]** Los alambres superconductores perfilados retorcidos cruzan estos canales bajo un ángulo no agudo y de esta manera después de cada cuarto de vuelta del desplazamiento del tornillo son refrigerados adicionalmente en contacto directo con el refrigerante desde el exterior.

**[0024]** De esta manera, también en esta variante todos los alambres se encuentran en condiciones electromagnéticas, mecánicas y térmicas absolutamente idénticas.

**[0025]** De acuerdo con la tecnología de fabricación (sin o con tensión previa mecánica) y la condición de aplicación, es posible prever como material para el tubo exterior un material, que presenta un coeficiente de dilatación mayor o menor que el material de los alambres superconductores perfilados. Dado el caso, las propiedades del material del tubo exterior se adapta a las propiedades del material superconductor, para asegurar que se mantienen la forma y la resistencia del canal de refrigeración central. Otro criterio decisivo de selección del material para el tubo exterior es una resistencia eléctrica alta con una resistencia mecánica suficientemente alta.

**[0026]** Los procedimientos para la fabricación de un cable hueco superconductote pueden presentar varias etapas de procedimiento en secuencia diferente. Además, el procedimiento para la fabricación de un cable hueco superconductor de acuerdo con la invención puede depender también de las posibilidades para fabricar alambres superconductores perfilados.

**[0027]** Uno de los procedimientos de acuerdo con la invención para la fabricación de un cable hueco superconductor presenta las siguientes etapas del procedimiento. En primer lugar, se fabrica un tubo exterior compacto con una sección transversal interior de forma circular y con una pared interior cilíndrica, lo más lisa posible. Además, se fabrican alambres superconductores perfilados con un perfil de la sección transversal de una dovola o bien Keystone, como se conoce para puentes de piedra romanos o para

bóvedas de crucería. A tal fin, el perfil de la sección transversal de los alambres superconductores perfilados presenta una sección de curvatura exterior, que está adaptada a la sección transversal interior de forma circular del tubo exterior. Además, el perfil de la sección transversal presenta una sección de curvatura interior, que está adaptado a la sección transversal de forma circular del canal de refrigeración. Por último, el perfil de la sección transversal presenta cantos laterales, que están alineados perfilados sobre el punto medio de un canal de refrigeración a formar.

**[0028]** Después de que han sido fabricados estos dos componentes principales del cable hueco de acuerdo con la invención, se reúnen en primer lugar los alambres superconductores perfilados para formar un haz redondo circular estirado alargado alrededor de un canal de refrigeración central. Durante esta reunión se pueden emplear también medios auxiliares, como sustancias adhesivas, para garantizar una conexión por unión del material entre los alambres superconductores perfilados. A continuación se introduce este haz redondo circular de alambres superconductores perfilados en el tubo exterior compacto del cable hueco superconductor. Este procedimiento tiene la ventaja de que el cable hueco se puede componente de dos componentes que se pueden fabricar de manera independiente uno del otro.

**[0029]** En otra variante del procedimiento, el tubo exterior no se fabrica como componente compacto, sino que se fabrica en dos semicáscaras. Durante el montaje del cable hueco superconductor se insertan entonces los alambres superconductores perfilados fabricados en las semicáscaras. A continuación se reúnen las semicáscaras con superconductores perfilados dispuestos en el interior y se unen por soldadura entre sí. Este procedimiento tiene la ventaja de que después del proceso de soldadura se puede producir una contracción del tubo exterior, que provoca al mismo tiempo un prensado conjunto de obturación de los alambres superconductores perfilados dispuestos en el interior.

**[0030]** En otra variante del procedimiento, se arrollan alrededor de un haz de alambres superconductores perfilados unos alambres tensores en forma helicoidal, con preferencia en contra de la dirección de torsión de los alambres superconductores. A continuación se aplica una capa exterior aislante de electricidad y cerrada herméticamente sobre los alambres tensores. Esta variante del procedimiento tiene la ventaja de que se pueden fabricar de manera continua cables huecos superconductores de longitud ilimitada con alambres superconductores perfilados.

**[0031]** Otra variante del procedimiento prevé la posibilidad de calentar el tubo exterior como componente compacto y refrigerar un haz de alambres superconductores perfilados con canal de refrigeración central. A continuación se entrelazan los dos componentes uno dentro del otro. A continuación, el tubo exterior se retrae sobre el haz redondo circular de alambres superconductores perfilados estirados alargados y provoca un prensado de los alambres superconductores nos sobre los otros bajo la formación de un canal de refrigeración central. Este procedimiento tiene la ventaja de que se facilita la inserción del haz redondo circular de alambres superconductores con canal de refrigeración central en el tubo exterior compacto. En este caso, también es posible calentar solamente el tubo exterior macizo o refrigerar solamente el haz de alambres superconductores perfilados.

**[0032]** Un procedimiento preferido para la fabricación de alambres superconductores perfilados presenta las siguientes etapas del procedimiento. En primer lugar se fabrican en el procedimiento estándar alambres de multifilamentos superconductores con sección transversal redonda circular, que contienen, de acuerdo con las condiciones de aplicación previstas, una microestructura óptima, dado el caso con barreras adicionales de resistencia. A continuación se perfila el alambre superconductor redondo para formar los alambres superconductores perfilados. Este perfilado se puede realizar de las más diferentes maneras.

**[0033]** Por una parte, es posible emplear cilindros perfiladores correspondientes, que realizan la sección de curvatura interior y la sección de curvatura exterior, así como la forma de dovela de las superficies laterales. Además, es posible emplear para los cantos laterales también cilindros perfiladores, para prevenir un desplazamiento en los cantos laterales, de manera que los alambres superconductores perfilados se entrelazan más fuertemente entre sí durante el ensamblaje para formar un haz con canal de refrigeración central. En lugar de cilindros perfiladores es posible también que se prevea una embutición del perfil a través de una piedra perfiladora correspondiente, a través de la cual se embute el alambre preparado y en este caso se transforma en el perfil de sección transversal. Otra posibilidad consiste en un llamado forjado de transformación, en el que se genera el perfil deseado a través de procesos de forjado correspondientes.

**[0034]** En lugar de un tubo exterior macizo se puede realizar el recubrimiento de los alambres superconductores perfilados también con alambre tensor arrollado en forma helicoidal, por ejemplo de NiCr, figura 13. La capa exterior aislante de electricidad, cerrada herméticamente se fabrica a continuación, por ejemplo, a través de polimerización.

**[0035]** De acuerdo con una forma de realización, la invención se refiere, por lo tanto, a un cable hueco superconductor, que presenta las siguientes características:

- un tubo exterior (2) con una sección transversal interior de forma circular y pared interior cilíndrica (3);
- un canal de refrigeración central (4) con una sección transversal poligonal o de forma circular, que es menor que la sección transversal interior del tubo exterior (2), en el que entre la pared interior (3) y el canal de refrigeración (4) están dispuestos alambres superconductores (5) perfilados;
- alambres superconductores (5) perfilados, que presentan al menos un filamento superconductor (6) y que poseen un perfil de la sección transversal de una dovela o bien Keystone, como se conoce para puentes de piedra romanos o para bóvedas de crucería, en el que el perfil de la sección transversal de los alambres superconductores (5) perfilados presenta una sección de curvatura exterior (7), que está adaptada a la sección transversal interior poligonal o de forma circular del tubo exterior (2) y presenta una sección de curvatura interior (8), que está adaptada a la sección transversal de forma circular del canal de refrigeración, y el perfil de la sección transversal presenta cantos laterales (9, 10), que están alineados perfilados sobre el punto medio (11) del canal de refrigeración (4), de manera que los alambres superconductores (5) perfilados están dispuestos sobre la pared interior (3) del tubo exterior (2), y los alambres superconductores (5) perfilados forman con sus secciones interiores (8) el canal de refrigeración (4) del cable hueco superconductor (1).

**[0036]** El cable hueco superconductor se puede caracterizar porque los alambres superconductores (5) perfilados están dispuestos sobre la pared interior (3) del tubo exterior (2) del cable hueco superconductor (1) con sus secciones de curvatura exterior (7) y sus cantos laterales (9, 10) alineados entre sí en contacto mutuo tan hermético que, a todas las temperaturas de funcionamiento del cable hueco superconductor (1), mantienen un canal de refrigeración central (4) con sus secciones de curvatura interior (8).

**[0037]** Este cable hueco superconductor se puede caracterizar, porque la suma de las anchuras de los intersticios (s) de las posibles formaciones de intersticios radiales entre los alambres superconductores (5) perfilados a todas las temperaturas de funcionamiento del cable hueco superconductor (1) es mejor que la diferencia de longitudes ( $\Delta l$ ) entre la sección de curvatura exterior (7) y la sección de curvatura interior (8) de un alambre superconductor perfilado individual.

**[0038]** Además, el cable hueco superconductor se puede caracterizar porque los alambres superconductores (5) perfilados presentan cantos laterales (12, 13) perfilados que engranan entre sí.

**[0039]** Además, el cable hueco superconductor se caracteriza porque los alambres superconductores (5) perfilados presentan recubrimientos superficiales especiales o envolturas parciales de alta resistencia, para evitar los efectos de las corrientes parásitas y las pérdidas térmicas.

**[0040]** Además, el cable hueco superconductor se puede caracterizar porque los alambres superconductores (5) perfilados están retorcidos alrededor del canal de refrigeración central.

**[0041]** Además, el cable hueco superconductor se puede caracterizar porque los alambres superconductores (5) perfilados presentan superconductores cerámicos o superconductores de alta temperatura.

**[0042]** Además, el cable hueco superconductor se puede caracterizar porque el tubo exterior (2) presenta un contorno exterior (7) de forma circular, cuadrada o trapezoidal.

**[0043]** Además, el cable hueco superconductor se puede caracterizar porque el tubo exterior (2) presenta canales de refrigeración (18) en su dirección longitudinal.

**[0044]** Además, el cable hueco superconductor se puede caracterizar porque el coeficiente de dilatación térmica del material de un tubo exterior compacto (2) es mayor que el coeficiente de dilatación térmica de los superconductores (5) perfilados.

**[0045]** De acuerdo con otra forma de realización, la invención se refiere también a un procedimiento para la fabricación de un cable hueco superconductor (1), que presenta las siguientes etapas del procedimiento:

- fabricación de un tubo exterior (2) con una sección transversal interior de forma circular y con una pared interior cilíndrica (3);
- fabricación de alambres superconductores (5) perfilados con un perfil de la sección transversal de una dovela o bien Keystone como se conoce para puentes de piedra romanos o para bóvedas de crucería, de manera que el perfil de la sección transversal de los alambres superconductores (5) perfilados presenta una sección de curvatura exterior (7), que está adaptado a la sección transversal interior de forma circular del tubo exterior (2) y una sección interior (8), que está

adaptada a la sección transversal poligonal o de forma circular de un canal de refrigeración central (4) y de manera que el perfil de la sección transversal presenta cantos laterales (9, 10) que están alineados perfilados sobre el punto medio (11) de un canal de refrigeración (4) a formar;

- 5
- reunión de los alambres superconductores (5) perfilados para formar un haz (28) redondo circular estirado alargado alrededor de un canal de refrigeración central (4);
  - inserción del haz (28) redondo circular con canal de refrigeración central (4) en el tubo exterior (2).

10 **[0046]** De acuerdo con otra forma de realización, la invención se refiere a un procedimiento para la fabricación de un cable hueco superconductor (1), que presenta las siguientes etapas del procedimiento:

- 15
- fabricación de alambres superconductores (5) perfilados con un perfil de la sección transversal de una dovola o bien Keystone como se conoce para puentes de piedra romanos o para bóvedas de crucería, de manera que el perfil de la sección transversal de los alambres superconductores (5) perfilados presenta una sección de curvatura exterior (7), que está adaptado a la sección transversal interior de forma circular del tubo exterior (2) y una sección interior (8), que está adaptada a la sección transversal poligonal o de forma circular de un canal de refrigeración central (4) y de manera que el perfil de la sección transversal presenta cantos laterales (9, 10) que están alineados perfilados sobre el punto medio (11) de un canal de refrigeración (4) a formar;
- 20
- reunión de los alambres superconductores (5) perfilados para formar un haz (28) redondo circular estirado alargado alrededor de un canal de refrigeración central (4);
  - arrollamiento en forma de espiral del haz con al menos un alambre tensor;
  - recubrimiento del alambre tensor arrollado con una capa exterior aislante de electricidad y cerrada herméticamente del cable hueco superconductor.

25 **[0047]** De acuerdo con otra forma de realización, la invención se refiere a un procedimiento para la fabricación de un cable hueco superconductor (1), que presenta las siguientes etapas del procedimiento:

- fabricación de dos semicáscaras de un tubo exterior compacto (2) con una sección transversal interior de forma circular y una pared interior (3) cilíndrica;
- 30
- fabricación de alambres superconductores (5) perfilados con un perfil de la sección transversal de una dovola o bien Keystone como se conoce para puentes de piedra romanos o para bóvedas de crucería, de manera que el perfil de la sección transversal de los alambres superconductores (5) perfilados presenta una sección de curvatura exterior (7), que está adaptado a la sección transversal interior de forma circular del tubo exterior (2) y una sección interior (8), que está adaptada a la sección transversal poligonal o de forma circular de un canal de refrigeración central (4) y de manera que el perfil de la sección transversal presenta cantos laterales (9, 10) que están alineados perfilados sobre el punto medio (11) de un canal de refrigeración (4) a formar;
- 35
- reunión de los alambres superconductores (5) perfilados para formar un haz (28) redondo circular estirado alargado alrededor de un canal de refrigeración central (4);
- 40
- reunión de las semicáscaras con haz colocado en el interior para formar un tubo exterior compacto del cable hueco superconductor.

**[0048]** Estos procedimientos para la fabricación de alambres superconductores perfilados para un cable hueco superconductor presentan la siguiente etapa del procedimiento:

- perfilado de la forma redonda estándar de los alambres superconductores (5).

45 **[0049]** El perfilado del alambre se puede realizar por medio de cilindros perfiladores.

**[0050]** Además, el perfilado del alambre se puede realizar por medio de una piedra perfiladora.

**[0051]** Además, el perfilado del alambre se puede realizar por medio de forjado de transformación.

**[0052]** Además, se puede prever una envoltura parcial adicional de los alambres superconductores perfilados a través de recubrimientos metálicos.

50 **[0053]** A continuación se explica en detalle la invención con la ayuda de las figuras adjuntas:



La figura 1 muestra una sección transversal esquemática a través de un cable hueco superconductor de acuerdo con una primera forma de realización de la invención.

La figura 2 muestra una sección transversal esquemática a través de un cable hueco superconductor de acuerdo con una segunda forma de realización de la invención.

5 La figura 3 muestra una sección transversal esquemática a través de un detalle del cable hueco superconductor según la figura 2.

La figura 4 muestra una sección transversal esquemática a través de un cable hueco superconductor de acuerdo con una tercera forma de realización de la invención.

10 La figura 5 muestra una sección transversal esquemática a través de la forma de partida de un alambre superconductor antes del perfilado.

La figura 6 muestra una sección transversal esquemática a través de un alambre superconductor perfilado después de una conformación del perfil para un cable hueco superconductor de la primera forma de realización de la invención según la figura 1.

15 La figura 7 muestra una sección transversal esquemática a través de un alambre superconductor perfilado después de una conformación perfiladora para un cable superconductor de la segunda forma de realización de la invención según la figura 2.

La figura 8 muestra una sección transversal esquemática a través de un superconductor perfilado después de una conformación perfiladora para un cable conductor hueco superconductor de la tercera forma de realización de la invención.

20 La figura 9 muestra una sección trasversal esquemática a través de un cable hueco superconductor de acuerdo con una cuarta forma de realización de la invención.

La figura 10 muestra la sección transversal esquemática a través de dos variantes de un cable hueco superconductor de acuerdo con una quinta forma de realización de la invención.

25 La figura 11 muestra una sección transversal esquemática a través de un cable hueco superconductor de acuerdo con una sexta forma de realización de la invención.

La figura 12 muestra una sección transversal esquemática a través de un cable hueco superconductor de acuerdo con una séptima forma de realización de la invención.

La figura 13 muestra una sección transversal esquemática a través de un cable hueco superconductor de acuerdo con una octava forma de realización de la invención.

30 La figura 14 muestra una foto como figura 14a y un esbozo esquemático como figura 14b de un cable hueco superconductor del tipo CICC en la forma de realización estándar.

La figura 15 muestra una foto como figura 15a y una sección transversal esquemática como figura 15b a través de un cable hueco superconductor del tipo CICC de acuerdo con el estado de la técnica (cable POLO).

35 La figura 16 muestra una foto como figura 16a y un esbozo esquemático como figura 16b de un cable superconductor del tipo Nuklotron en forma de realización estándar.

La figura 17 muestra una sección trasversal esquemática a través de un cable hueco superconductor del tipo Nuklotron con construcción mejorada.

40 La figura 1 muestra 7 una sección transversal esquemática a través de un cable hueco superconductor 1 de acuerdo con una primera forma de realización de la invención. Este cable hueco 1 presenta un canal de refrigeración central 4, que es rodeado por alambres superconductores 5 perfilados, que son, en general, alambres de multifilamentos retorcidos. Estos alambres superconductores 5 perfilados forman, en la sección transversal mostrada aquí, un anillo, que rodea directamente el canal de refrigeración central 4, de manera que estos alambres superconductores perfilados pueden ser refrigerados intensivamente a través de la corriente de refrigerante. Los alambres superconductores 5 perfilados son retenidos juntos por medio de un tubo exterior macizo 2, que presenta una pared interior 3, en la que se apoyan estrechamente los alambres superconductores 5 perfilados. Los alambres superconductores 5 perfilados presentan una sección transversal, que corresponde a una dovela de un puente romano o bien de una bóveda gótica.

50 **[0054]** Este perfil presenta una sección de curvatura exterior 7, que está adaptada a la curvatura de la pared interior 3 del tubo exterior 2. Además, la sección transversal de los alambres superconductores 5 perfilados presenta una sección de curvatura interior 8, que está adaptada a la curvatura del canal de refrigeración central 4. En esta primera forma de realización de la invención, los alambres

superconductores 5 perfilados presentan cantos laterales lisos 9 y 10, que están alineados al punto central 11 del canal de refrigeración central 4. La anchura del intersticio  $s$  entre cantos laterales de alambres superconductores 5 adyacentes no puede ser discrecionalmente grande, puesto que de lo contrario se destruye la estructura de forma anular de los alambres superconductores 5 perfilados y, por lo tanto, el canal de refrigeración 4 durante el funcionamiento. La suma  $n \cdot s$  de todas las anchuras de los intersticios  $s$  debe ser, por lo tanto, menor que la diferencia longitudinal  $\Delta l$  de la longitud de la curvatura  $l_{ak}$  de la sección de curvatura exterior 7 menos la longitud de la curvatura  $l_{ik}$  de la sección de curvatura interior 8 del perfil de los alambres superconductores 5 perfilados.

**[0055]** Puesto que en esta primera forma de realización de la invención están previstos veinte alambres superconductores 5 perfilados, la anchura del intersticio 2 tolerable entre los cantos laterales de alambres superconductores 5 adyacentes está extraordinariamente limitada. Esta limitación depende, no en último lugar, de la diferencia entre el radio interior  $r_a$  del tubo exterior 2 y el radio interior  $r_i$  del canal de refrigeración 4, como se explica en las fórmulas anteriores. Un cable hueco superconductor 1 de este tipo tiene la ventaja de que la resistencia a la circulación dentro del canal de refrigeración 4 es extraordinariamente reducida y, por lo tanto, se pueden conseguir una tasa de refrigeración alta así como una estabilidad mecánica alta. Además, tiene la ventaja de que el medio de refrigeración contacta directamente con los alambres superconductores 5 perfilados y, por lo tanto, se garantiza una refrigeración intensiva también para impulsos térmicos cortos. Por último, este cable hueco tiene la ventaja de que está constituido esencialmente sólo por dos capas o bien componentes: a saber, por el haz concéntrico de alambres superconductores 5 perfilados en forma de dovela y por el tubo exterior macizo 2. Además, con objeto del aislamiento eléctrico (adicional), este cable hueco superconductor 1 de acuerdo con la invención puede presentar alrededor del contorno exterior 17 del tubo exterior 2 una cinta arrollada de Kapton y, en caso necesario, puede tener otras capas de aislamiento eléctrico, por ejemplo de cintas de fibras de vidrio. Esto se aplica para todas las variantes de acuerdo con las figuras 1, 2, 4, 9, 10, 11 y 12.

**[0056]** El cable hueco 1 de la segunda forma de realización se diferencia del cable hueco 1 de la primera forma de realización por el perfilado de los alambres superconductores 5 perfilados. Adicionalmente a la forma de dovela, estos alambres superconductores 5 perfilados presentan un desplazamiento de la magnitud  $v$ , que mejora adicionalmente el entrelazado de los alambres superconductores 5 perfilados y permite anchuras de intersticio  $s$  mayores entre los cantos laterales 12 y 13 perfilados adyacentes de estos alambres superconductores 5 perfilados. Ya se ha explicado anteriormente en detalle la relación entre la anchura posible del intersticio  $s$  así como la diferencia de longitud  $l$  entre secciones de curvatura exteriores e interiores y la magnitud  $v$  del desplazamiento.

**[0057]** La figura 3 muestra una sección transversal esquemática a través de un detalle del cable hueco superconductor 1 de acuerdo con la figura 2. Los componentes con las mismas funciones que en las figuras anteriores se identifican con los mismos signos de referencia y no se explican adicionalmente. La figura 3 muestra a escala ampliada el entrelazado de los alambres superconductores 5 perfilados a través del desplazamiento 19 de los cantos laterales 12 y 13 perfilados adyacentes.

**[0058]** La figura 4 muestra una sección transversal esquemática a través de un cable hueco superconductor 1 de acuerdo con una tercera forma de realización de la invención. Esta tercera forma de realización de la invención se diferencia de las formas de realización anteriores porque el número de los alambres superconductores 5 perfilados se ha reducido desde veinte en las figuras 1 y 2 a diez en la figura 4. El entrelazado de los alambres superconductores 5 perfilados se refuerza porque los alambres superconductores 5 presentan sobre sus cantos laterales 12 y 13 perfilados unos perfiles en punta 20. Estos perfiles en punta 20 forman un desplazamiento de la magnitud  $v$  que, en colaboración con la diferencia de la longitud  $\Delta l$  entre las secciones de curvatura exterior e interior 7 y 8 de las secciones transversales de los alambres superconductores 5 perfilados, incrementa la tolerancia para la anchura del intersticio  $s$ , de manera que se puede permitir una

**[0059]** tolerancia más elevada frente a las anchuras del intersticio  $s$  que se forman, sin que se rompa la estructura de los alambres superconductores 5 dispuestos en el interior del tubo exterior 2.

**[0060]** La figura 5 muestra una sección transversal esquemática a través de un alambre de multifilamentos superconductor en la forma de realización estándar. Tales alambres presentan una sección transversal redonda circular y contienen, como se ha descrito anteriormente, filamentos superconductores retorcidos en una matriz de Cu más o menos compleja.

**[0061]** La figura 6 muestra una sección transversal esquemática a través de un alambre superconductor 5 perfilado de acuerdo con una conformación perfiladora para un cable hueco superconductor 1 de la primera forma de realización de la invención según la figura 1. En esta conformación se lamina un alambre según la figura 5 con diferentes perfiles laminados, de manera que, por una parte, se obtiene una sección de curvatura exterior 7 y, por otra parte, una sección de curvatura interior 8. Además, los cantos laterales 9 y 10 son laminados por medio de cilindros ajustados de manera correspondiente en ángulo entre sí. En lugar de un tren de laminación se puede emplear también un procedimiento de pultrusión a

través de una placa de embutición de conformación correspondiente. En este procedimiento se transforma el alambre redondo mostrado en la figura 5 en un alambre superconductor 5 perfilado con una sección transversal predeterminada a través de la placa de embutición.

5 **[0062]** La figura 7 muestra una sección transversal esquemática a través de un alambre superconductor 5 perfilado de acuerdo con una conformación perfiladora para un cable hueco superconductor 1 de la segunda forma de realización de la invención según la figura 2. En lugar de cantos laterales lisos, como se muestran todavía en la figura 6, en este perfilado se forman cantos laterales 12 y 13 perfilados o bien se estiran a través de una placa de embutición. En este caso, se obtienen apéndices escalonados 19, que posibilitan el entrelazado de los alambres superconductores 5 perfilados durante el montaje del cable hueco.

10 **[0063]** La figura 8 muestra una sección transversal esquemática a través de un alambre superconductor 5 perfilado después de una conformación perfiladora para un cable hueco superconductor 1 de la tercera forma de realización de la invención según la figura 4. También este perfil con una punta de perfil 20 sobre el canto lateral 12 se puede obtener a través de conformación correspondiente de una sección transversal en primer lugar redonda circular, como se muestra en la figura 5. A tal fin, se pueden emplear o bien cuatro cilindros perfiladores de formas diferentes o una tobera de embutición configurada de forma correspondiente, para fabricar los cuatro cantos perfilados de la sección transversal de los alambres superconductores 5 perfilados. Una ventaja de estos alambres superconductores 5 perfilados de la figura 8 frente a la figura 7 es que se puede realizar una curvatura 20 del canto lateral perfilado 12 en un perfil de punta de este tipo a través de laminación de perfil más fácilmente que en el perfil con un apéndice escalonado 19 de la figura 7, y que el entrelazado de las estas formas contribuye a la alineación automática de los alambres superconductores perfilados alrededor del canal de refrigeración.

20 **[0064]** La figura 9 muestra una sección transversal esquemática a través de un cable conductor hueco superconductor 1 de acuerdo con una cuarta forma de realización de la invención. Los componentes con las mismas funciones que en las figuras anteriores se identifican con los mismos signos de referencia y no se explican adicionalmente. La diferencia con las formas de realización anteriores consiste en que como tubos exterior macizo 2 se selecciona un tubo exterior que presenta, en efecto, una pared interior cilíndrica 3, pero posee un contorno exterior cuadrado 17, con lo que se eleva, por una parte, la resistencia del tubo exterior 2 y, por otra parte, se puede simplificar esencialmente la fabricación de bobinas compactas.

25 **[0065]** La figura 10 muestra secciones transversales esquemáticas a través de dos variantes de un cable conductor hueco superconductor 1 de acuerdo con una quinta forma de realización de la invención. Los componentes con las mismas funciones que en las figuras anteriores se identifican con los mismos signos de referencia y no se explican adicionalmente. La diferencia de esta quinta forma de realización de la invención con respecto a las formas de realización anteriores consiste en que el tubo exterior 2 con contorno exterior cuadrado 17 en las esquinas del tubo exterior cuadrado 2 presenta canales de refrigeración 18 adicionales en la dirección longitudinal del cable hueco 1. De esta manera, se puede intensificar todavía más la acción de refrigeración, como ya se ha descrito anteriormente, para este cable hueco 1.

30 **[0066]** La figura 11 muestra una sección transversal esquemática a través de un cable conductor hueco superconductor 1 de acuerdo con una sexta forma de realización de la invención, en la que el signo de referencia 5 identifica alambres superconductores perfilados, el signo de referencia 2 identifica el tubo exterior y el signo de referencia 18 identifica canales de refrigeración en el tubo exterior 2 en su extensión longitudinal. A través de estos canales de refrigeración exterior 18, que se extienden a lo largo de la pared interior del tubo exterior y que presentan un orificio para el haz de alambres superconductores perfilados, que es más estrecho que una sección de curvatura exterior del perfil de los alambres, se refrigeran los alambres superconductores perfilados retorcidos, por lo tanto, después de cada cuatro de vuelta del desplazamiento del tornillo adicionalmente en contacto directo con el refrigerante desde el exterior. También en esta variante, todos los alambres se encuentran en condiciones electromagnéticas, mecánicas y térmicas absolutamente idénticas.

35 **[0067]** La figura 12 muestra una sección trasversal esquemática a través de un cable conductor hueco superconductor 1 de acuerdo con la séptima forma de realización de la invención. La séptima forma de realización de la invención se diferencia de las formas de realización anteriores porque el tubo exterior 2 presenta un contorno exterior 17 de forma trapezoidal. Este contorno exterior 17 de forma trapezoidal puede ventajoso cuando varios de estos cables huecos superconductores 1 se agrupan para formar una bobina de forma circular o deben fabricarse geometrías especiales de bobinas mecánicamente compactas y lo más estables posible.

40 **[0068]** La figura 13 muestra una sección transversal esquemática a través de un cable hueco superconductor 1 de acuerdo con una octava forma de realización de la invención. Los componentes con las mismas funciones que en las figuras anteriores se identifican con los mismos signos de referencia y no se explican adicionalmente. El tubo exterior se forma aquí por dos capas, una primera capa con un

5 alambre tensor 33 arrollado en forma helicoidal, por ejemplo de NiCr y una capa exterior 34 aislante de electricidad, cerrada herméticamente, por ejemplo fabricada a través de polimerización. Como ya se ha descrito anteriormente, esta octava forma de realización de la invención se diferencia de las formas de realización anteriores porque en lugar de un tubo exterior macizo, se realiza la envoltura de los alambres superconductores perfilados con alambre tensor arrollado en forma helicoidal, después de lo cual se aplica a continuación una capa exterior cerrada herméticamente, aislante de electricidad.

10 **[0069]** La figura 14 muestra una foto como la figura 14a y un esbozo esquemático como figura 14b de un cable hueco superconductor del tipo CICC en forma de realización estándar. Los componentes con las mismas funciones que en las figuras anteriores se identifican con los mismos signos de referencia y no se explican en detalle. La figura 14 muestra un haz de alambres superconductores 30 retorcidos, que se extiende dentro de un tubo 32 herméticamente cerrado.

15 **[0070]** La figura 15 muestra una foto como figura 15a y una sección transversal esquemática como figura 15b a través de un cable hueco superconductor del tipo CICC según el estado de la técnica (cable POLO). Los componentes con las mismas funciones que en las figuras anteriores se identifican con los mismos signos de referencia y no se explican en detalle. En este caso, unos alambres superconductores 30 están dispuestos sobre un tubo interior macizo 21 como tubo de apoyo, estando previsto el cable de refrigeración interior para una corriente de helio de dos fases y pudiendo conducirse helio supercrítico directamente entre los alambres superconductores 30 con alta resistencia a la circulación.

20 **[0071]** La figura 16 muestra una foto como figura 16a y un esbozo esquemático como figura 16b de un cable superconductor del tipo Nuklotron en forma de realización estándar. Los componentes con las mismas funciones que en las figuras anteriores se identifican con los mismos signos de referencia y no se explican en detalle. La figura 16 muestra en un canal de refrigeración central, que se forma por un tubo interior compacto 21 de CuNi, un helio 35 de dos fases que es conducido en el mismo. Sobre el tubo interior 21 están arrollados alambres superconductores 30, que son retenidos juntos por un alambre tensor de NiCr 33. Una cinta de Kapton 24 forma un aislamiento eléctrico y una cinta de fibras de vidrio 25 sirve para el aislamiento térmico del cable hueco superconductor.

30 **[0072]** La figura 17 muestra una sección transversal esquemática a través de un cable hueco superconductor 1 del tipo Nuklotron con construcción mejorada. Los componentes con las mismas funciones que en las figuras anteriores se identifican con los mismos signos de referencia y no se explican adicionalmente. La figura 17 muestra un canal de refrigeración central 4, que se forma por un tubo interior compacto 21 de CuNi. Sobre el tubo interior 21 están arrollados alambres superconductores 5 perfilados, que se mantienen juntos por medio de un alambre tensor de NiCr 33. Una capa exterior 34 herméticamente cerrada, aislante eléctrica, está dispuesta sobre el alambre tensor 33.

Lista de signos de referencia

35 **[0073]**

- 1 Cable hueco superconductor
- 2 Tubo exterior
- 3 Pared interior del tubo exterior
- 4 Canal de refrigeración central
- 40 5 Alambre superconductor perfilado
- 6 Filamento superconductor
- 7 Sección de curvatura exterior
- 8 Sección de curvatura interior
- 9 Canto lateral liso
- 45 10 Canto lateral liso
- 11 Punto medio del canal de refrigeración
- 12 Canto lateral perfilado
- 13 Canto lateral perfilado
- 14 Filamento superconductor

## ES 2 356 611 T3

15		Núcleo metálico, o bien alma de la matriz de estabilización de un conductor multifilamentos superconductor
16		Envolvente de la matriz de estabilización de un conductor multifilamentos superconductor de un alambre perfilado
5	17	Contorno exterior del tubo exterior
	18	Canales de refrigeración del tubo exterior en la dirección longitudinal
	19	Apéndice escalonado (perfil escalonado)
	20	Perfilen punta de un canto lateral
	21	Tubo interior compacto
10	24	Cinta de Kapton
	25	Cinta de fibras de vidrio
	26	Envolvente exterior del tubo interior
	27	Pared interior del tubo interior
	28	Haz con filamentos superconductores
15	29	Alambre a partir de un haz con filamentos superconductores y matriz de estabilización
	30	Alambres superconductores
	31	Haz de alambres superconductores retorcidos
	32	Tubo herméticamente cerrado
	33	Alambre tensor arrollado en forma de espiral
20	34	Capa exterior de obturación hermética, aislante eléctrica
	35	Helio de dos fases
	$l_{ak}$	Longitud de la sección de curvatura exterior
	$l_{ik}$	Longitud de la sección de curvatura interior
	$\Delta l$	Diferencia de longitudes
25	s	Anchura del intersticio
	v	Magnitud del desplazamiento
	n	Número de los alambres superconductores perfilados por cada cable hueco superconductor
	$r_a$	Radio interior del tubo exterior
	$r_i$	Radio del canal de refrigeración central

## REIVINDICACIONES

1. Cable hueco superconductor (1), que presenta las siguientes características:
- un tubo exterior (2) con una sección transversal de forma circular y pared interior cilíndrica (3),
- un canal de refrigeración central (4) con una sección transversal poligonal o de forma circular, que es menor que la sección transversal interior del tubo exterior (2);
- 5 alambres superconductores (5) perfilados, que están dispuestos entre la pared interior (3) y el canal de refrigeración (4) y que presentan al menos un filamento superconductor (6) y que poseen un perfil de la sección transversal de una dovela o bien Keystone, como se conoce para puentes de piedra romanos o para bóvedas de crucería;
- 10 en el que el perfil de la sección transversal de los alambres superconductores (5) perfilados presenta una sección de curvatura exterior (7), que está adaptada a la sección transversal interior poligonal o de forma circular del tubo exterior (2) y el perfil de la sección transversal de los alambres superconductores (5) presenta cantos laterales (9, 10), que están alineados sobre el punto medio (11) del canal de refrigeración (4);
- 15 caracterizado porque los alambres superconductores (5) perfilados están dispuestos sobre la pared interior (3) del tubo exterior (2);
- el perfil de la sección transversal de los alambres superconductores (5) perfilados presenta una sección de curvatura interior (8), que está adaptada a la sección transversal de forma circular del canal de refrigeración (4);
- 20 los alambres superconductores (5) perfilados forman con sus secciones de curvatura interior (8) el canal de refrigeración cilíndrico (4) del cable hueco superconductor (1), de manera que están dispuestos con sus cantos laterales (9, 10) alineados radialmente tan estrechamente apoyados entre sí y con sus secciones de curvatura exterior (7) tan herméticamente sobre la pared interior del tubo exterior (2) que se pueden mantener en posición en unión positiva y en unión por aplicación de fuerza y mantienen el canal de refrigeración (4) a todas las temperaturas de funcionamiento del cable hueco superconductor (1).
- 25
2. Cable hueco superconductor de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque la suma de las anchuras de los intersticios (s) de las formaciones de intersticios radiales posibles entre los alambres superconductores (5) perfilados a todas las temperaturas de funcionamiento del cable hueco superconductor (1) es menor que la diferencia de las longitudes ( $\Delta l$ ) entre la sección de curvatura exterior (7) y la sección de curvatura interior (8) de un alambre superconductor perfilado interior.
- 30
3. Cable hueco superconductor de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque los alambres superconductores (5) perfilados presentan cantos laterales (12, 13) perfilados que engranan entre sí.
- 35
4. Cable hueco superconductor de acuerdo con la reivindicación 1 ó 2, caracterizado porque los alambres superconductores (5) perfilados presentan recubrimientos superficiales especiales o envolturas parciales de alta resistencia, para reducir los efectos de la corriente parásita y las pérdidas térmicas.
5. Cable hueco superconductor de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque los alambres superconductores (5) perfilados están retorcidos alrededor del canal de refrigeración central.
- 40
6. Cable hueco superconductor de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque los alambres superconductores (5) retorcidos presentan superconductores cerámicos o superconductores de alta temperatura.
- 45
7. Cable hueco superconductor de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el tubo exterior (2) presenta un contorno exterior (17) de forma circular, cuadrado o trapezoidal.
8. Cable hueco superconductor de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el tubo exterior (2) presenta canales de refrigeración (18) en su dirección longitudinal.
- 50
9. Cable hueco superconductor de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el coeficiente de dilatación térmica del material de un tubo exterior compacto (2) es mayor que el coeficiente de dilatación térmica de los superconductores (5) perfilados.

10. Procedimiento para la fabricación de un cable hueco superconductor (1) de acuerdo con la reivindicación 1, que presenta las siguientes etapas del procedimiento:

5 fabricación de alambres superconductores (5) perfilados con un perfil de la sección transversal de una dovela o bien Keystone, como se conoce para puentes de piedra romanos o para bóvedas de crucería, en el que el perfil de la sección transversal de los alambres superconductores (5) perfilados presenta una sección de curvatura exterior (7) y una sección interior (8), que está adaptada a una sección transversal poligonal o de forma circular de un canal de refrigeración central (4) y en el que el perfil de la sección transversal presenta cantos laterales (9, 10), que están alineados sobre el punto medio (11) de un canal de refrigeración (4) que se forma a través de las secciones interiores (8).

10 reunión de los alambres superconductores (5) perfilados para formar un haz redondo circular (28) extendido alargado, de manera que los cantos laterales (9, 10) de los alambres superconductores (5) perfilados adyacentes están contiguos entre sí y forman con sus secciones interiores (8) un canal de refrigeración central (4); y opcionalmente

15 inserción del haz (28) redondo circular con el canal de refrigeración central (4) en un tubo exterior (2) o

reunión de dos semi-cáscaras de un tubo exterior (2) compacto con una sección transversal interior de forma circular y pared interior cilíndrica (3) con haz (28) dispuesto en el interior para formar un tubo exterior compacto del cable hueco superconductor.

20 11. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 10, caracterizado porque se realiza un arrollamiento de forma helicoidal del haz (28) con al menos un alambre tensor y se lleva a cabo una cobertura del alambre tensor arrollado con una capa exterior de aislamiento eléctrico y de cierre hermético del cable hueco superconductor antes de la reunión de las semi-cáscaras que forman el tubo exterior.

25 12. Procedimiento para la fabricación de alambres superconductores perfilados para un cable hueco superconductor de acuerdo con la reivindicación 10 y 11, que presenta la siguiente etapa de procedimiento:

perfilado de la forma redonda estándar de los alambres superconductores (5).

13. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 12, caracterizado porque el perfilado del alambre se realiza por medio de cilindros perfiladores.

30 14. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 12, caracterizado porque el perfilado del alambre se realiza a través de una piedra perfiladora.

15. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 12, caracterizado porque el perfilado del alambre se realiza por medio de forzado de transformación.

35 16. Procedimiento de acuerdo con una de las reivindicaciones 9 a 13, caracterizado porque se lleva a cabo una envoltura parcial adicional de los alambres superconductores perfilados por medio de recubrimiento metálico.

FIG 1

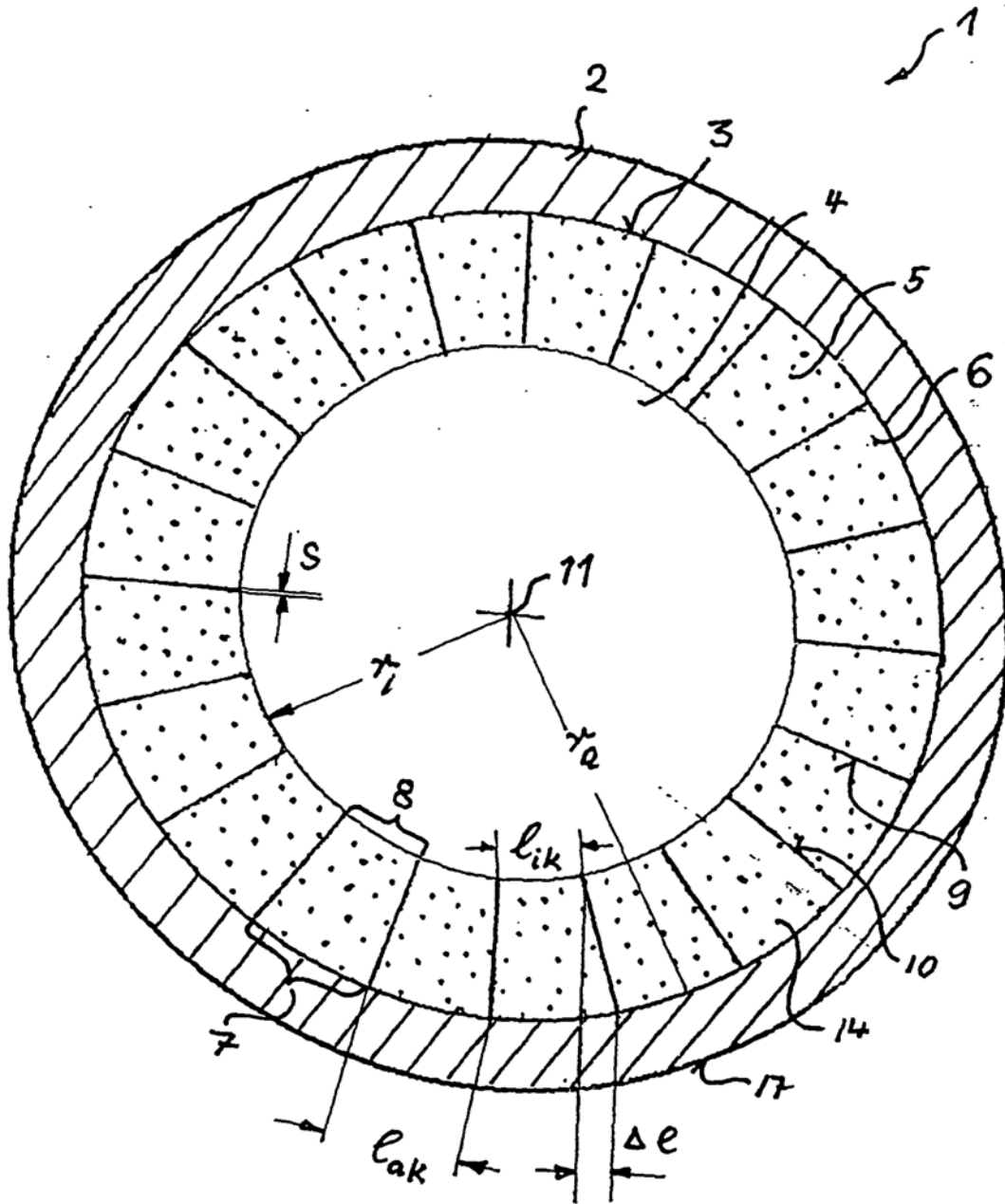




FIG 2

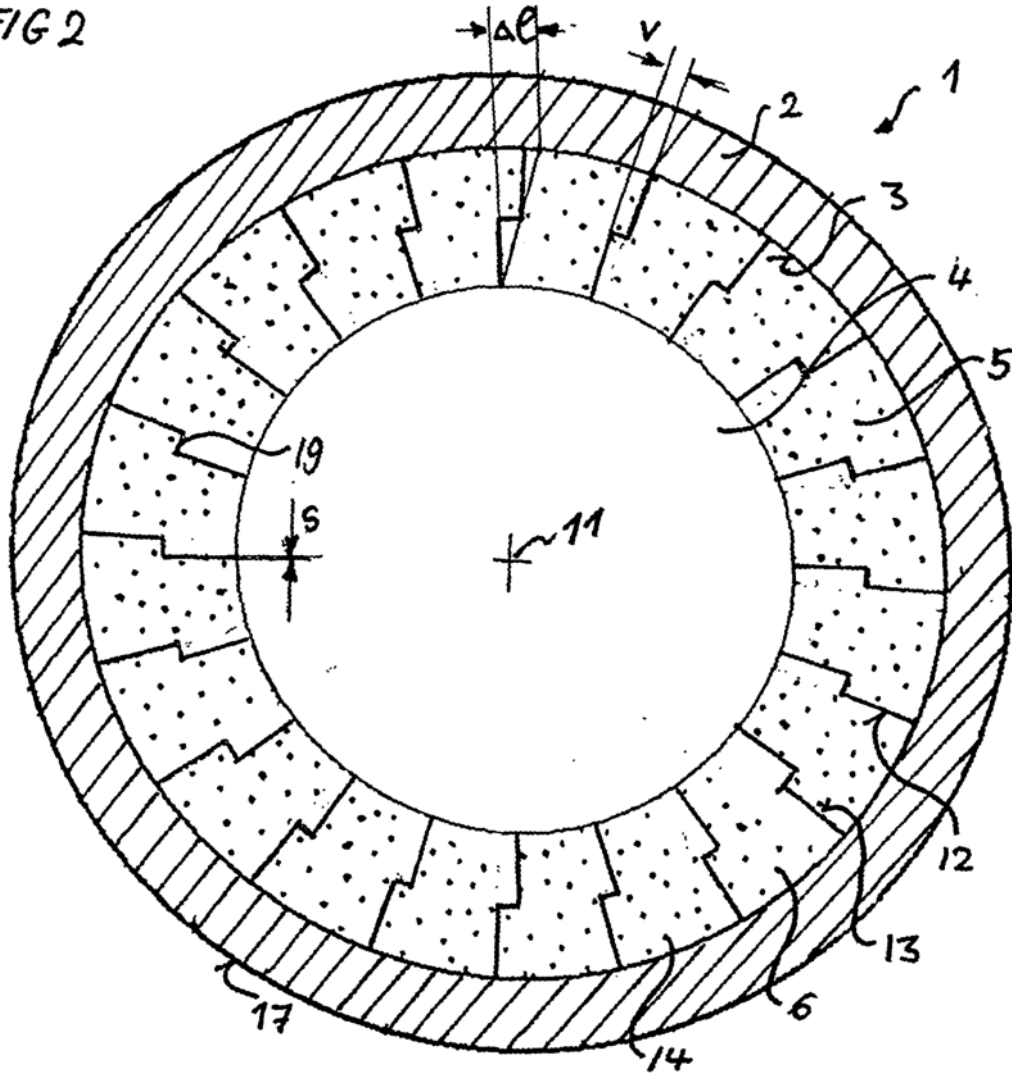


FIG 3

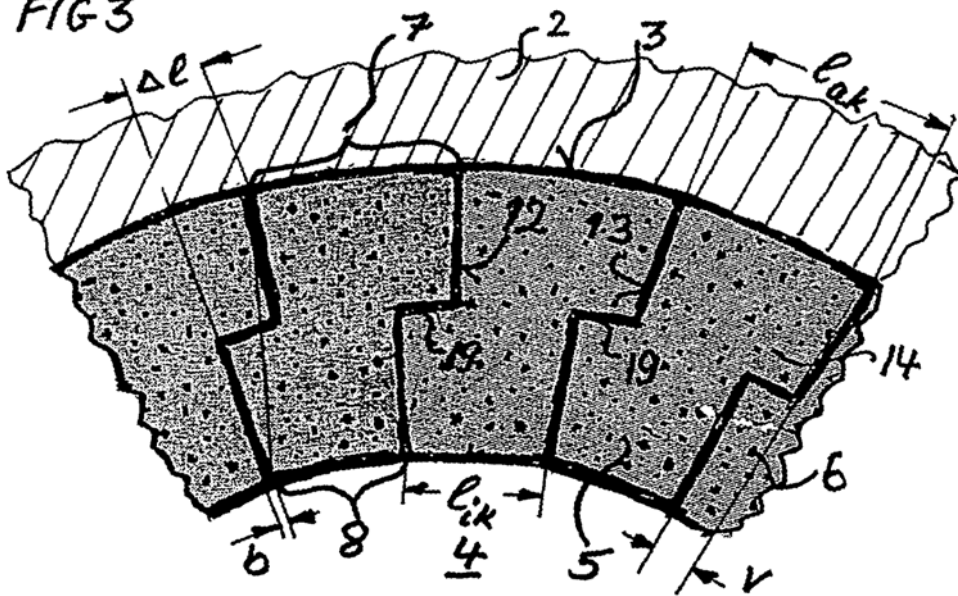


FIG 4

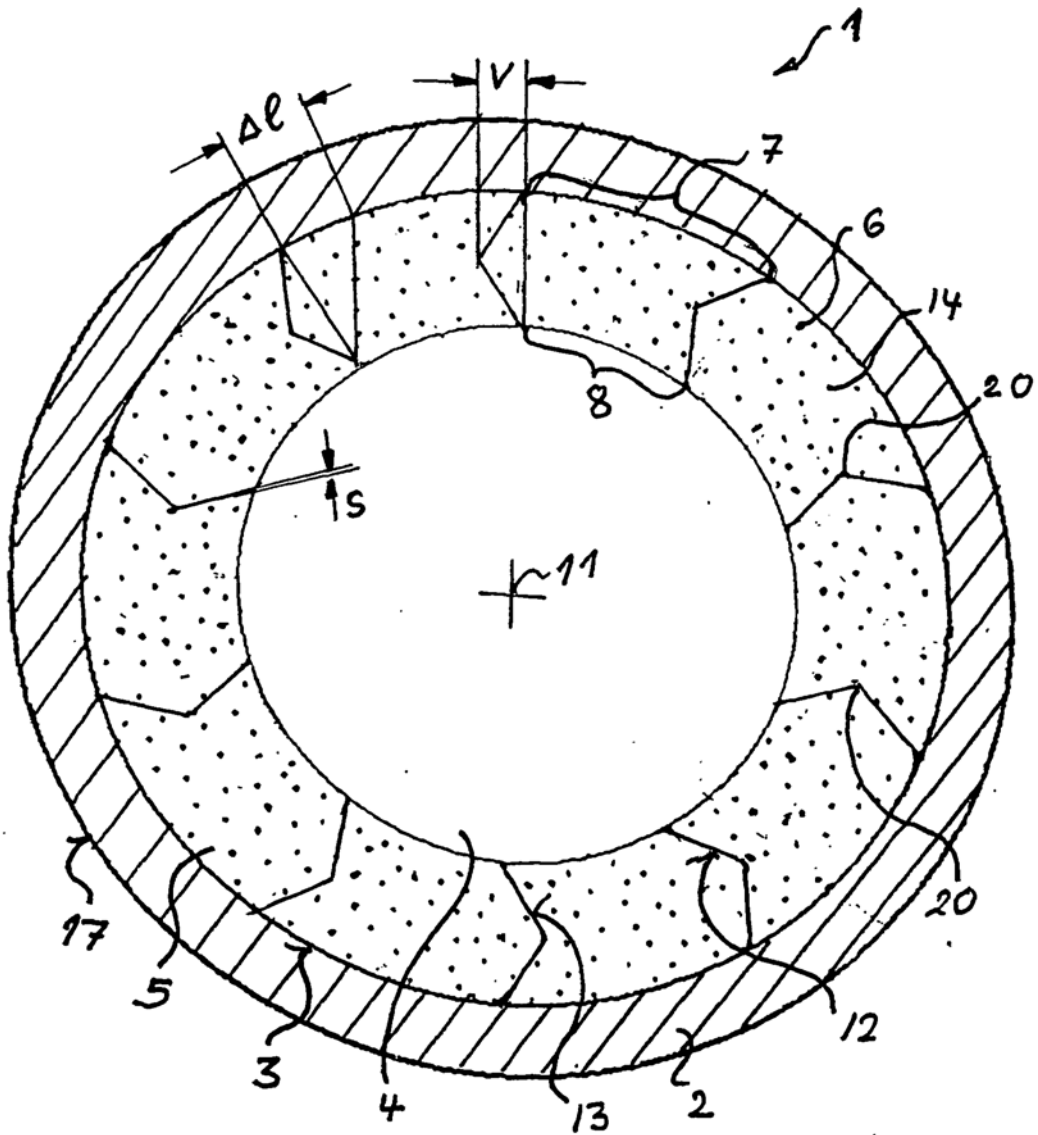


FIG 5

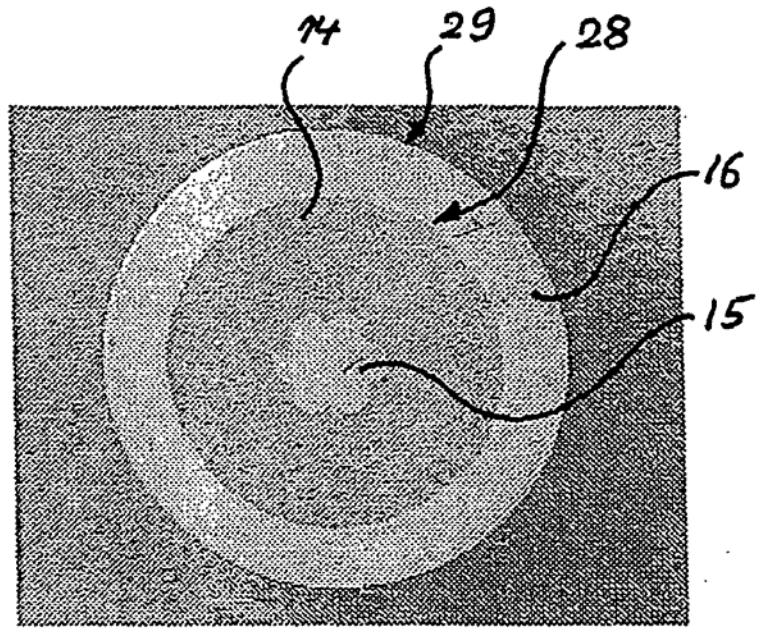


FIG 6

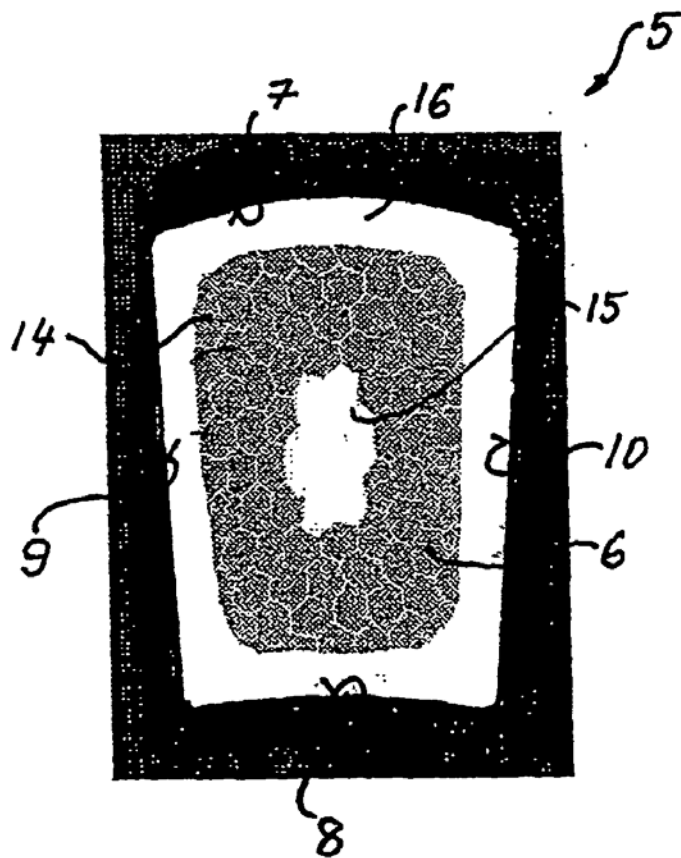


FIG 7

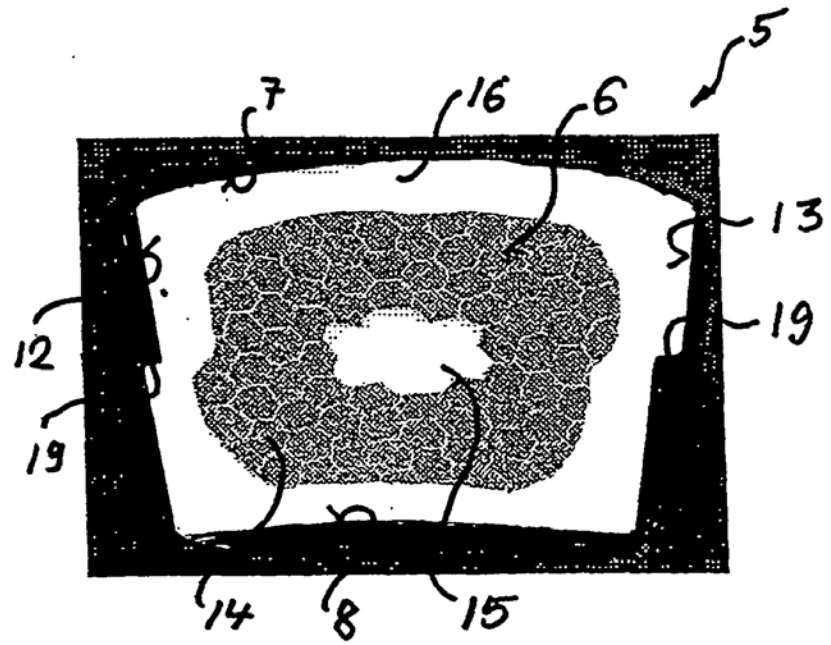


FIG 8

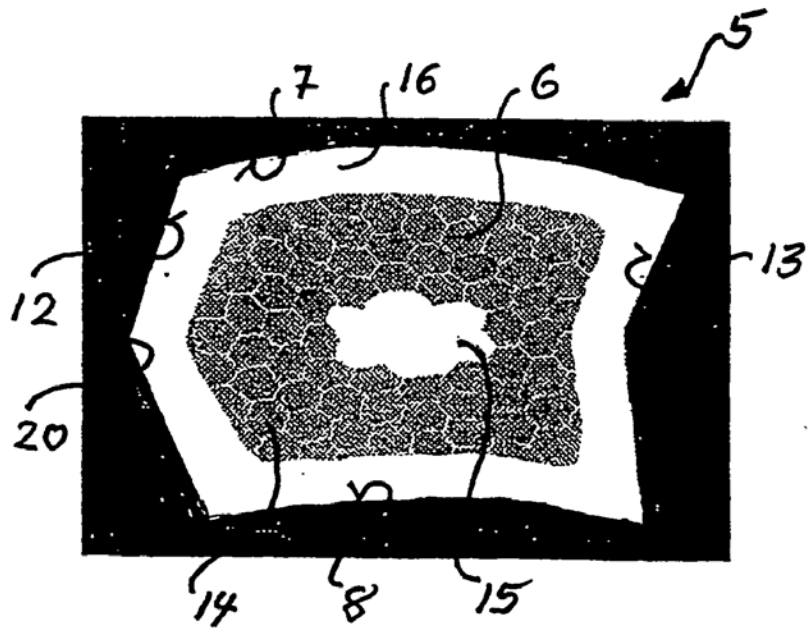


FIG 9

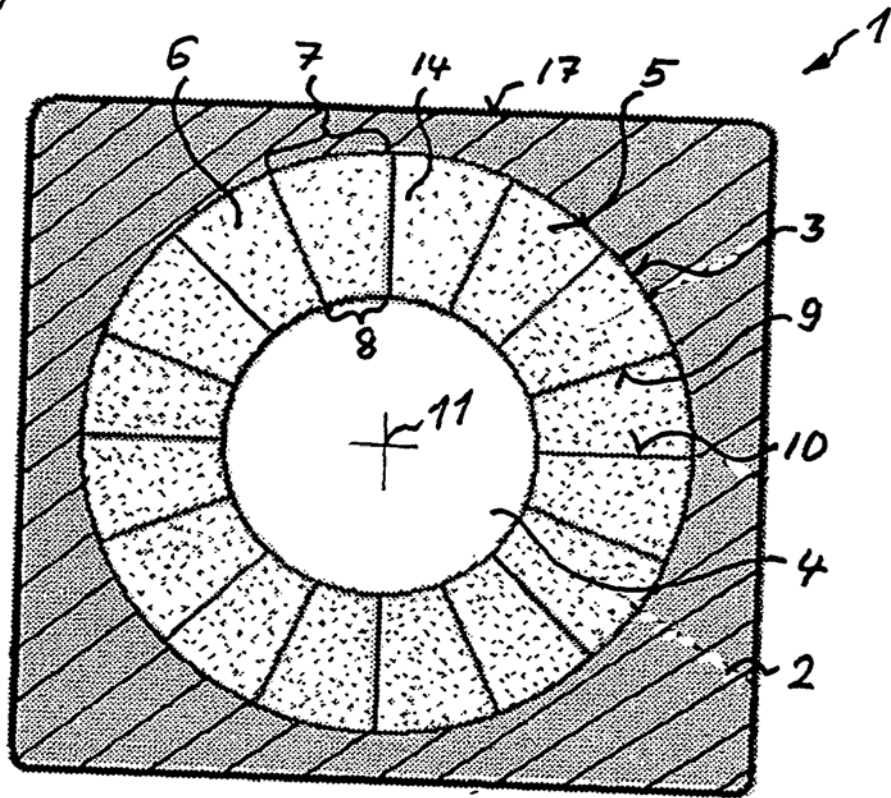


FIG 10

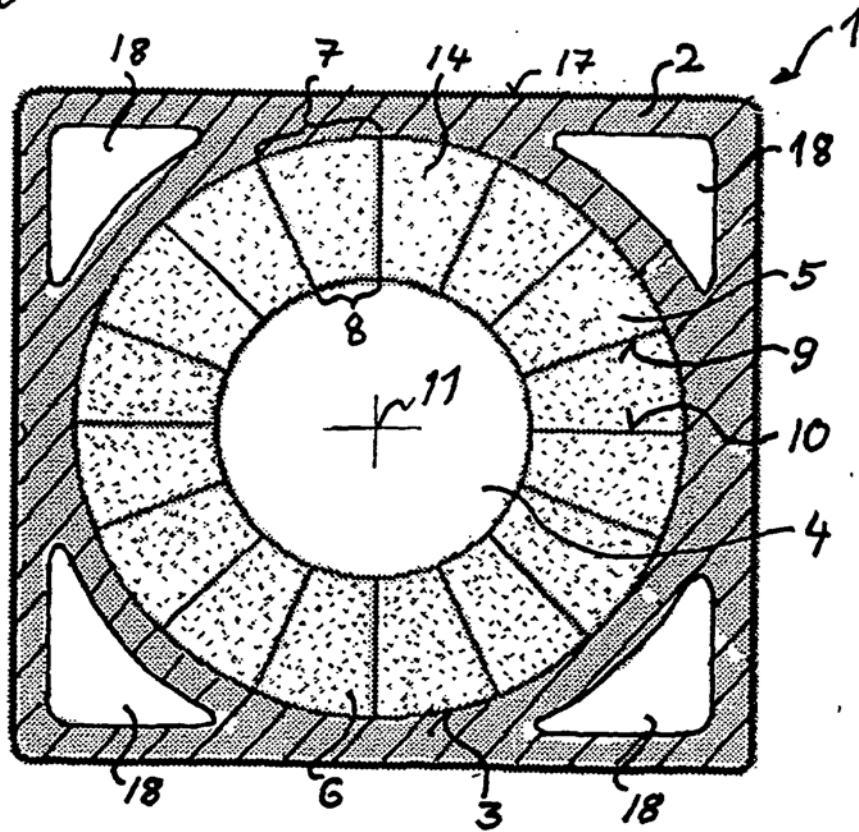


FIG 11

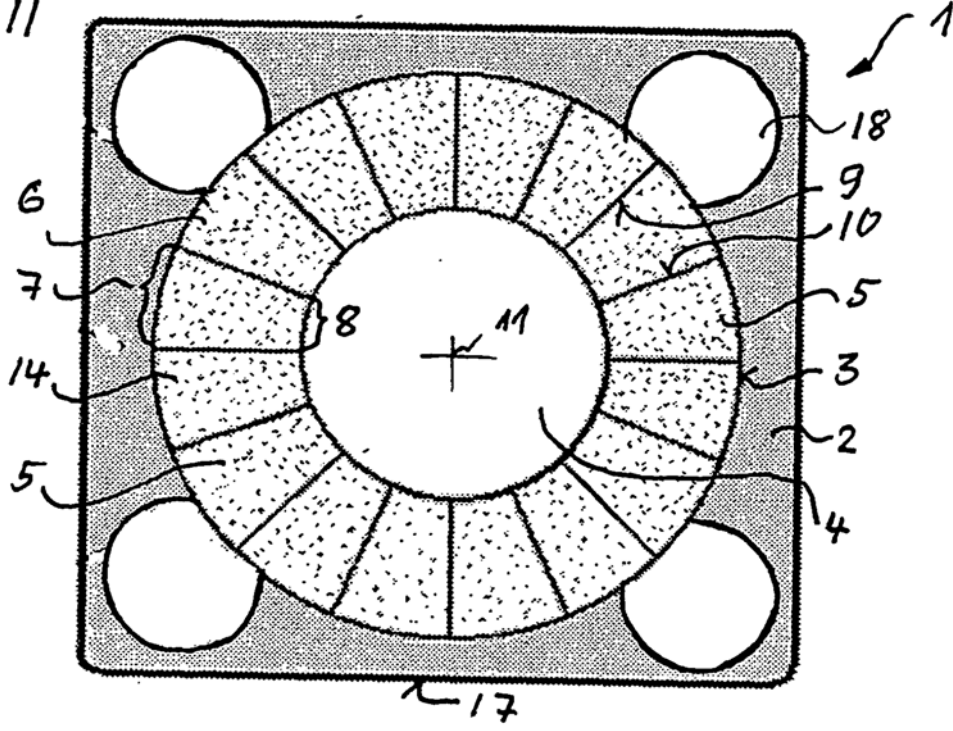


FIG 12

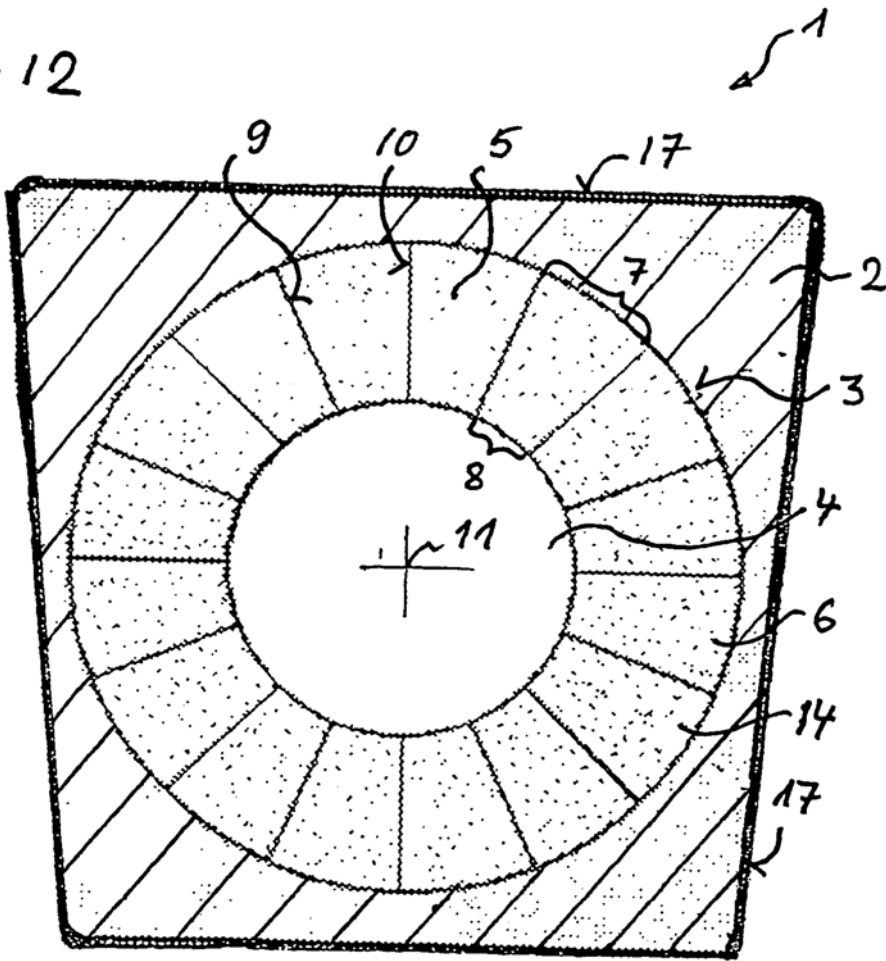


FIG 13

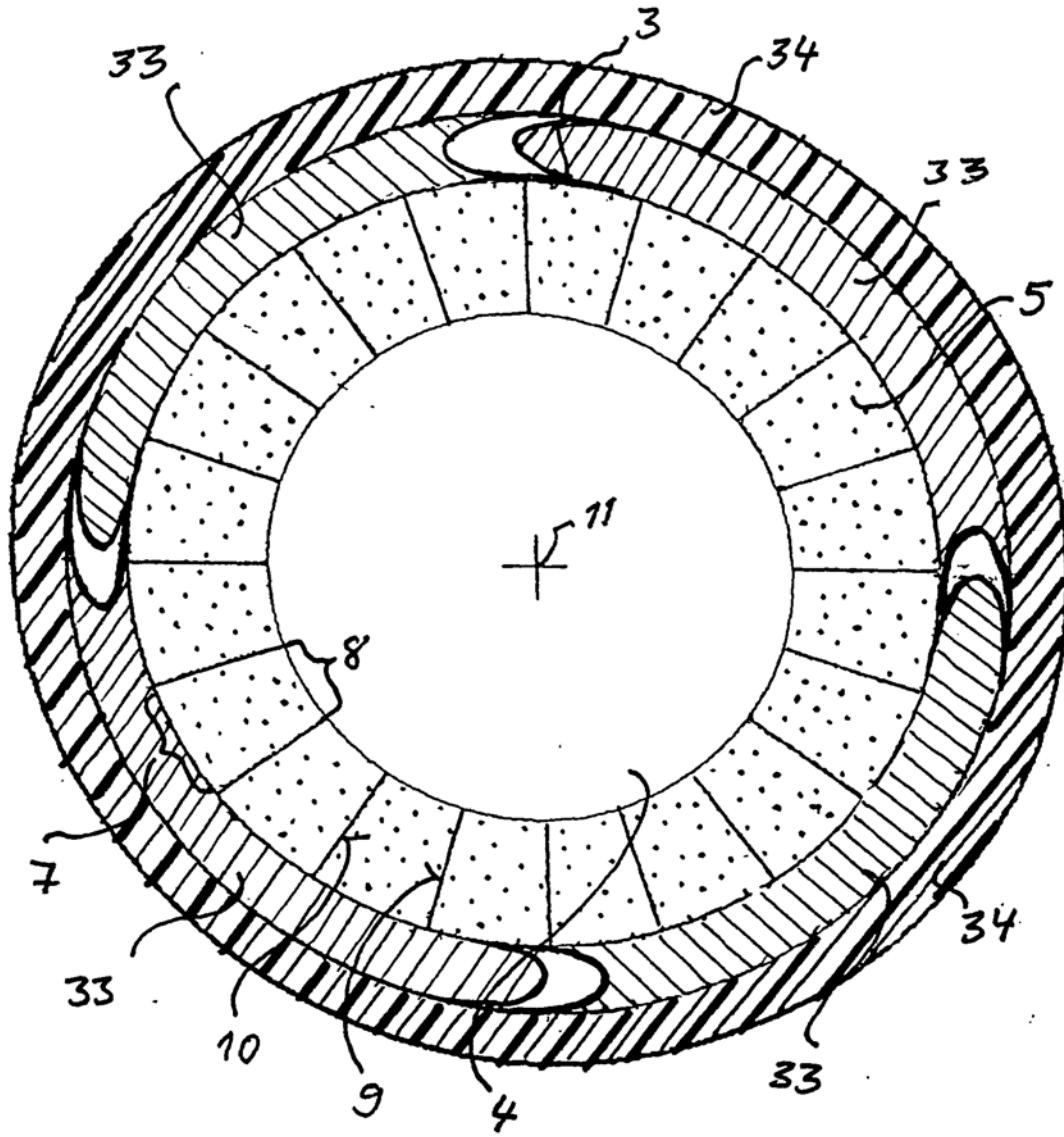


FIG 14a

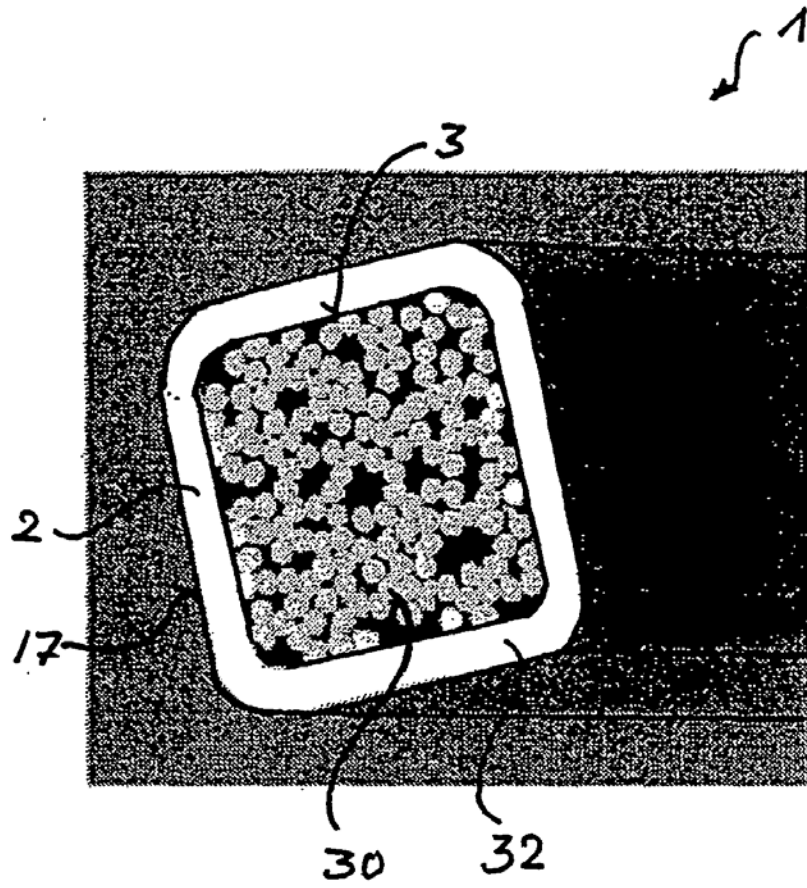


FIG 14b

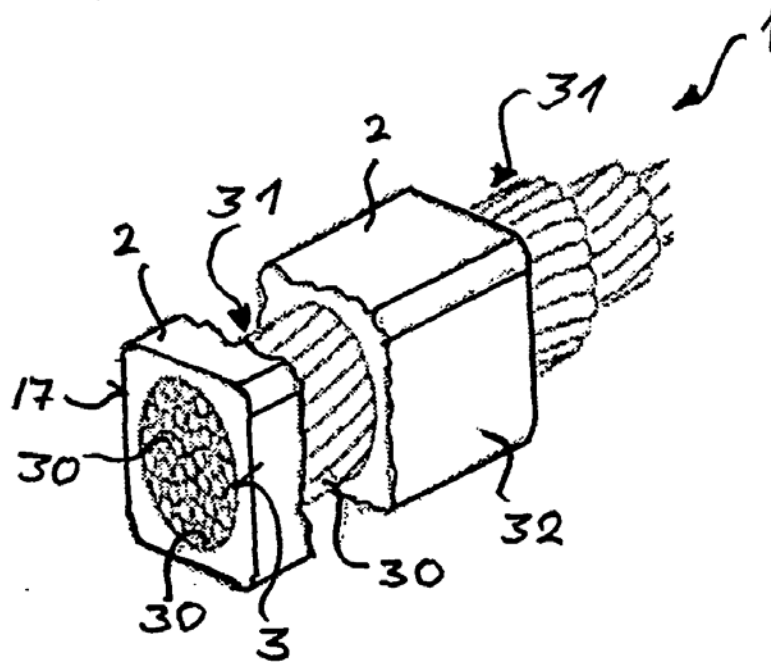




FIG 15a

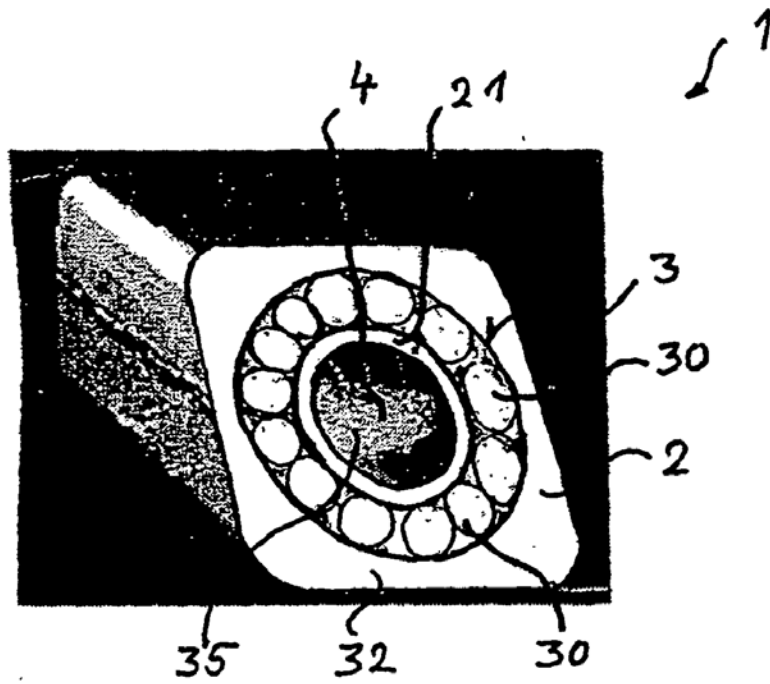


FIG 15b

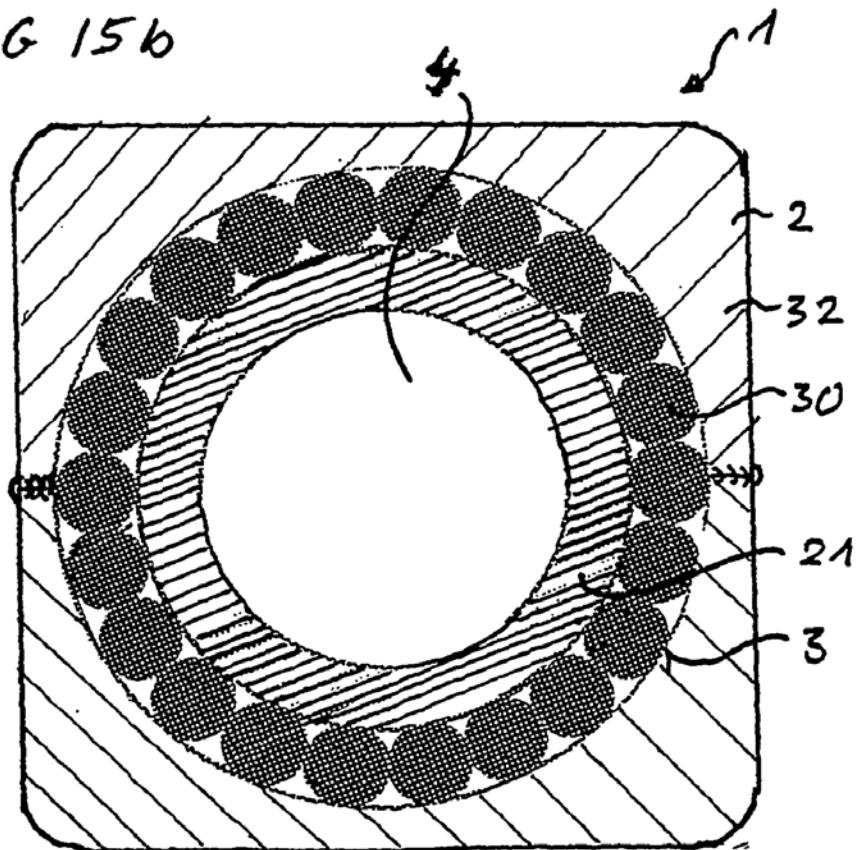


FIG 16a

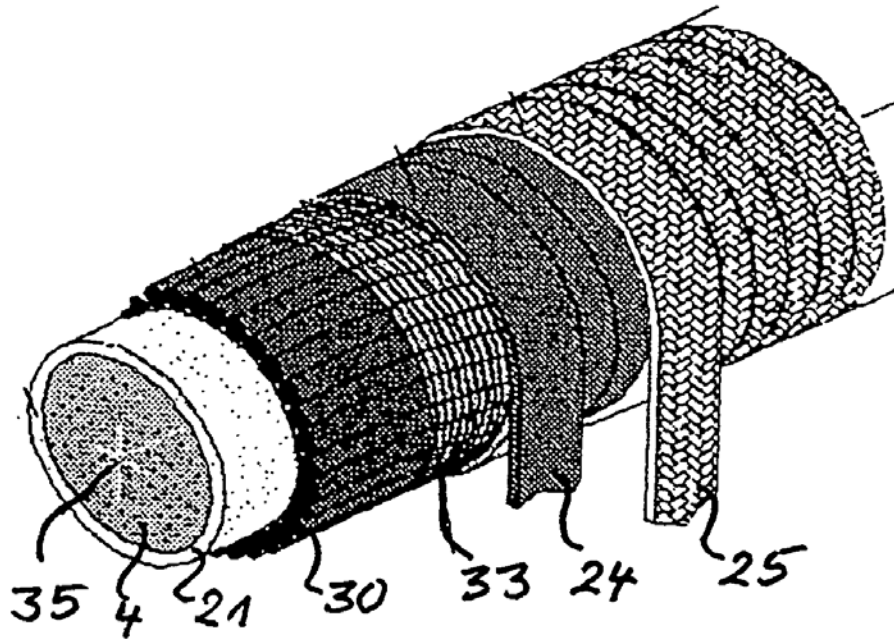


FIG 16b

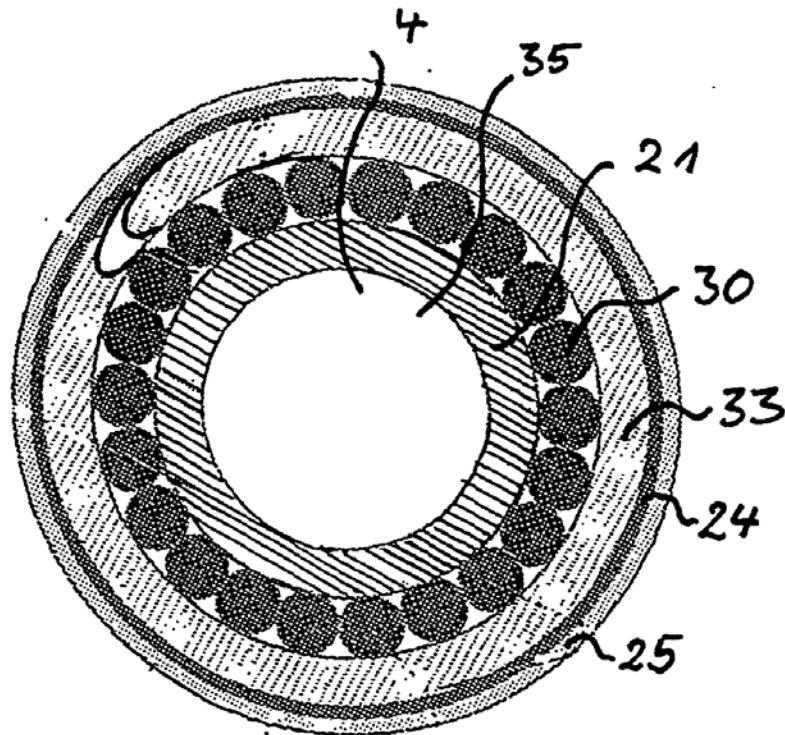


FIG 17

