

(19)



Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets



(11)

EP 0 608 271 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:

24.04.1996 Patentblatt 1996/17

(21) Anmeldenummer: **92920483.2**

(22) Anmeldetag: **08.10.1992**

(51) Int Cl.⁶: **H01R 4/68**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/DE92/00851

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 93/08616 (29.04.1993 Gazette 1993/11)

(54) **SUPRALEITERBEREICH EINES HOCHSTROMÜBERGANGSSTÜCKS**

SUPERCONDUCTIVE ZONE OF A HIGH CURRENT JUNCTION PIECE

ZONE SUPRACONDUCTRICE D'UNE PIECE DE JONCTION POUR COURANT FORT

(84) Benannte Vertragsstaaten:
CH DE FR GB LI NL SE

(30) Priorität: **18.10.1991 DE 4134492**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
03.08.1994 Patentblatt 1994/31

(73) Patentinhaber: **Forschungszentrum Karlsruhe GmbH**
D-76133 Karlsruhe (DE)

(72) Erfinder: **FRIESINGER, Günter**
D-7514 Eggenstein-Leopoldshafen (DE)

(74) Vertreter: **Gottlob, Peter, Dipl. Ing.**
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Stabsabteilung
Patente und Lizenzen
Weberstrasse 5
D-76133 Karlsruhe (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
FR-A- 1 585 965 **US-A- 3 522 361**
US-A- 3 760 092

- **WELDING JOURNAL Bd. 42, September 1963, MIAMI (USA) Seiten 411-S - 413-S RALLS, DONLEVY, ROSE, WULFF 'Joining current contacts to superconducting wire.'**

EP 0 608 271 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Übergangsstück, das ein normalleitendes Bauteil mit einem supraleitenden Bauteil verbindet. Entlang dem Übergangsstück tritt während des Betriebs eine Temperaturdifferenz derart auf, daß an seinem kalten, dem supraleitenden Bauteil nächstliegenden Ende und dem anschließenden Teil von der Übergangszone Temperaturbedingungen für Supraleitung bestehen. Im weiteren Teil der Übergangszone bis zum warmen Ende besteht Normalleitung.

Am kalten Ende wird ähnlich oder gleich wie am warmen Ende des Übergangsstücks das Bauteil angeklemmt oder angeschraubt, so daß dort bei Maximalstrom ein thermisch beherrschbarer und tolerierbarer Stromübergang stattfinden kann.

Wärmetransport in Richtung supraleitenden Bauteils muß während des Betriebs unter allen Umständen vermieden werden bzw. auf die maximal zulässige Leistung beschränkt bleiben. Hauptsächliche Gründe für einen solchen sind einerseits Wärmeleitung im Normalleiter und andererseits Wärmeerzeugung (Joule'sche Wärme $R I^2$) darin. Letzteres ist unvermeidlich während des Betriebs. Die Schnittstelle Normalleiter-Supraleiter ist daher konstruktiv sorgfältig zu gestalten.

In der Zeitschrift Cryogenics, April 1975 werden in dem Aufsatz "A review of current leads for cryogenic devices", Seiten 193-200, von Yu. L. Buyanov et al. zunächst theoretische Untersuchungen über die Wärmeerzeugung und den Wärmetransport an stromdurchflossenen Leitern angestellt, die dann schließlich zur theoretischen Auslegung gekühlter Stromzuführungen für einen vorgegebenen Strom dienen. In diesem Aufsatz wird die Parallelschaltung von Supra- und Normalleiter erwähnt (Seite 197, 1. Spalte). Die Parallelschaltung eines Supraleiters zum normalleitenden Teil der Stromzuführung am kalten Ende ist bisher für hohe Ströme konstruktiv und fertigungsmäßig noch nicht gelöst wurden. In einer Schlußbetrachtung (Seite 197, Spalte 2 unten) wird der problematische Betrieb mit zeitvariablen Strömen angesprochen jedoch nicht vertieft.

In der OS 27 48 419 ist ein Übergangsstück zwischen Supraleiter und Normalleiter beschrieben. Im Innern des zylinderförmigen Übergangsstück sind perforierte Scheiben gestapelt, die den Wärmetauscher bilden. An einem Ende beginnend, ist zur Mitte des Übergangsstücks hin ein Supraleiterbereich dadurch geschaffen, daß die Drahtenden der Supraleiterwicklung unmittelbar in die Mantelfläche des Übergangsstücks eingelassen und verlötet sind, und so dort eine unlösbare Verbindung besteht.

In Welding Research Supplement von September 1963 wird auf den Seiten 411-s bis 416-s unter dem Titel "Joining Current Contacts to Superconducting Wire" von K.M. Ralls et al. über den Einfluß des Übergangswiderstands an der Schnittstelle zwischen normal- und supraleitendem Material berichtet. Der Übergang ist überlappend ausgeführt. Die möglichst widerstandsarme Über-

gangszone wird durch sorgfältiges Vorlöten und Löten sowie anschließendes Verpressen der Leiterenden oder durch Ultraschallbeschichten des Supraleiters mit Indium und anschließendes Kaltschweißen erhalten. Es wird so ein optimaler, jedoch unlösbarer Übergang an der Schnittstelle geschaffen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, den Übergang von einer supraleitenden auf eine normalleitende Zuleitung so zu gestalten, daß die Temperaturzunahme vom kalten Ende zum warmen Ende monoton steigend ist und die beiden Zuleitungen nach Bedarf wiederverwendbar voneinander gelöst werden können, dabei soll keine Wärme vom warmen Ende über den Übergangsbereich zum kalten Ende transportiert werden, und zwar bei jedem vorgesehenen Stromfluß durch die Zuleitungen, und das Ende der supraleitenden Zuleitung sicher im supraleitenden Zustand gehalten werden.

Diese Aufgabe wird durch einen Übergang mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst. Der Übergang ist ein separates Bauteil, an dessen warmem und kaltem Ende die normalleitende bzw. supraleitende Zuleitung lösbar angeschlossen ist. Um im Betrieb sichere supraleitende Bedingungen am kalten Ende aufrecht zu erhalten, sind dort zylinderförmige Einsätze eingelassen. Diese Einsätze sind Träger aus normalleitendem Material auf deren Mantelfläche sich spiralg um die Einsatzachse Nuten winden, in die über die Trägerlänge Supraleiter eingelassen sind. Die Träger haben höchstens die Länge der Bohrung.

Vorzugsweise werden in den zylinderischen Einsatz zunächst Längsnuten auf der Manteloberfläche durch Fräsen oder Hobeln oder entsprechende spanabhebende Bearbeitung eingebracht. Über die gesamte Länge der Nuten sind die Supraleiterdrähte eingelegt. Die Nutenränder werden dann gehämmert oder gepreßt, so daß die Supraleiterdrähte gut leitend und unverrückbar auf dem Einsatz 8 eingebettet sind. Anschließend wird der Einsatz 8 um seine Achse tordiert, und zwar soweit, daß kein Abriß an einem der eingelegten Supraleiterdrähte 12 auftritt. Die letzte Behandlung des supraleiterdrahtbestückten Einsatzes 12 vor dem Einsetzen in die Stromzuführung besteht im Ausglühen desselben.

Verfahren zur Fertigung solcher Einsätze werden in der FR-PS 1.585.965 beschrieben. Sie werden dort als Kupplungen oder Verbindungsstücke beschrieben, da sie supraleitende Drahtenden oder Filamente miteinander verbinden sollen, und zwar in Umgebungen in denen Temperaturen für Supraleitung bestehen. In der US-PS 3,760,092 wird eine der Kupplungen beschrieben, auf deren Mantel die Supraleiterdrähte spiralg um die Achse des Verbindungsstücks verlaufen.

Am Übergangsstück, in der Fachliteratur auch Stromzuführung genannt, wird schließlich der Spalt 11 zwischen Bohrlochwandung und supraleiterbündelbesetztem Einsatz mit Lot ausgegossen. Dadurch ist eine thermisch und elektrisch gut leitende Übergangszone hergestellt.

Durch diese Parallelschaltung von normalleitendem

zu supraleitenden Material wird eine automatische Anpassung der normalleitenden Länge der Stromzuführung an den jeweiligen Betriebsstrom des supraleitenden Bauteils 5 erreicht. Die normalleitende Länge der Stromzuführung bestimmt sich gemäß der Näherungsformel

$$\frac{L \times I_{\max}}{A} = \text{const.}$$

(aus Cryogenics, Dec 1969, "OPTIMIZATION OF CURRENT LEADS INTO A CRYOSTAT", J. M. Lock, S. 438-442, insbesondere S. 439, 2. Spalte). Bei höheren Strömen wird der normalleitende Bereich, der die ohmschen Verluste erzeugt, kürzer, bei niedrigeren Strömen wird er länger.

Gemäß den geforderten Sicherheitsmaßnahmen ist der Einsatz oder sind die Einsätze in der Stromzuführung hart- oder weich eingelötet. Das ist hauptsächlich eine Frage des zeitlichen Stromverlaufs.

Um eine selbständiges Auslöten zu verhindern, kann von Vorteil sein, das kalte Ende im gesamten Bereich der eingelassenen Einsätze strangzupressen oder zu hämmern. Auch hierdurch wird eine gute Kontaktierung zwischen dem Einsatz oder den Einsätzen und der Stromzuführung erreicht.

Ein Übergangsstück mit den Kennzeichen des Anspruchs 3 wird vorteilhafterweise für Bauteile, die sehr hohe Ströme führen müssen, verwendet. Das sind bisher meist Hochstrommagnete für die Fusionsforschung oder Stromspeicher aus supraleitenden Magneten in Energieversorgungsnetzen. Auch ist ihr Einsatz zum Test von Leiterproben vorteilhaft, wie auch für supraleitende Kabel zum Führen hoher Ströme in Metallschmelzwerken.

Im Betrieb fließt der Kühlmittelstrom vom kalten Ende, dem Supraleiteranschluß, zum warmen Ende. In der Übergangszone herrschen Temperaturen, bei denen sich Supraleitung einstellen kann. Dadurch stellt sich bei Stromfluß, abhängig von der Stromstärke, automatisch ein Stromübergangsbereich innerhalb des Supraleiterbereichs von Normalleiter auf den Supraleiter in der Übergangszone und eine supraleitende Zone bis zum kalten Ende der Stromzuführung ein.

Der Temperaturanstieg vom kalten zum warmen Ende verläuft innerhalb eines vorbestimmten Toleranzbandes, und das selbst bei Leerlaufbetrieb, bei dem nur noch die Wärmeleitung über den Normalleiter besteht.

Um Wirbelstromeffekte zu unterbinden oder wenigstens auf ein tolerierbares Maß zu beschränken, hat sich die Tordierung des supraleiterdrahtbesetzten Einsatzes auf die Länge (Twistlänge) ca. zehnmal seines Durchmessers als vorteilhaft herausgestellt.

Ein Ausführungsbeispiel ist in der Zeichnung dargestellt und wird im folgenden näher beschrieben werden.

Es zeigen:

Figur 1: Übergangsstück mit Supraleiterbereich
Figur 2a: Schnitt durch das Übergangsstück im Supraleiterbereich

Figur 2b: Vergrößerte Darstellung des supraleiterdrahtbesetzten Einsatz

Figur 3: Temperaturverlauf über der Länge des Hochstromübergangsstücks.

Das Übergangsstück gemäß Figur 1 unterteilt sich in drei Bereiche: Ein warmes Ende 1, das der Stromversorgung am nächsten ist. Daran schließt sich ein Wärmetauscherbereich 3, auch Übergangszone 3 genannt, an, auf das das kalte Ende 4 folgt, welches dem angeschlossenen supraleitenden Bauteil 5 am nächsten ist.

Der Bereich Wärmetauscher 3 und kaltes Ende 4 wird von der funktionellen, konstruktiven und fertigungstechnischen Seite her noch etwas spezifischer unterteilt. So schließt sich dem warmen Ende 1 zunächst der normalleitende Bereich 6 der Stromzuführung an, der aus demselben Leitermaterial wie das warme Ende besteht. Diesem folgt ein Bereich aus dem gleichen Leitermaterial bis zum kalten Ende, in welchem sich zwei Bohrungen 15 befinden, in die jeweils ein Einsatz 8 eingelassen ist.

Figur 2 zeigt den Schnitt B durch das Übergangsstück mit eingelassenen Einsätzen 8 außerhalb des Anschlusses am kalten Ende 4.

Der supraleiterdrahtbestückte tordierte Einsatz 8 ist in dem Bohrloch 15 über die ganze Länge 7 eingelassen. Die Bohrlöcher 15 haben einen solchen Durchmesser, daß die Einsätze 8 gerade, ohne zu verkanten oder zu klemmen, eingebracht werden können.

Auch hier wurde die elektrisch wirksame Länge L vom Ende der Bohrung 15 bis zum warmen Ende 1, also nur im normalleitenden Material, anhand der o.e. Beziehung festgelegt. Damit kann sich das Übergangsstück bei maximalem Betriebsstrom I_{max} und dazu optimalem Kühlmittelfluß vom kalten Ende 4 zum warmen Ende 1 monoton steigend erwärmen, und zwar so, daß die Erwärmung im Anschlußbereich des kalten Endes 4 unterhalb der Supraleitersprungtemperatur mit nahezu waagrechter Tangente einsetzt und mit ebenfalls nahezu waagrechter Tangente am warmen Ende 1 der Stromzuführung bei Umgebungstemperatur endet, wie das Figur 3 zeigt. Dieser Temperaturanstieg kann für Ströme, die kleiner als der betriebliche Maximalstrom sind, bei Anpassung des Kühlmittelstromes eingestellt werden. Selbst bei Leerlauf, also kein Stromfluß, bei dem nur noch Wärmetransport vom warmen Ende 1 her im normalleitenden Material erfolgt und keine Stromwärme mehr erzeugt wird, läßt sich der Temperaturanstieg ähnlich dem für den Maximalstrom einstellen, wodurch der Gefahr des Vereisens am warmen Ende 1 begegnet wird und die Wärmezufuhr zum supraleitenden Bauteil 5 auf das tolerierbare Maß beschränkt bleibt.

Im Durchführungsbeispiel ist der Spalt 11 zwischen Einsatz 8, dem Supraleiterträger 8, mit Hartlot ausgegossen. In einer Art Vergießlötung dringt das Lot, durch die Schwerkraft getrieben, in den Spalt 11 ein. Erste Probelötungen ergaben einen Benetzungsgrad in Spalt 11 von etwa 98 %, so daß in dem Supraleiterbereich 7 ein

guter Strom - als auch Wärmeübergang besteht.

Der Einsatz 8, der aus demselben normalleitendem Material wie das Übergangsstück besteht, dient als Träger 8 für die in die Nuten eingepressten oder eingehämmerten Supraleiterdrähte 12.

Ein Supraleiterdraht 12 besteht hier aus kommerziell erhältlichen Supraleiterfilamenten 14 (Nb₃Sn), die um ein sogenanntes Stabilisierungskupfer 13 gewunden sind. Beim Einpressen oder Einhämmern in die Nuten des Einsatzes 8 kann sich der Supraleiterdraht 12 unter leichter Verformung unverrückbar an die Nutoberfläche anlegen. Dies ist wesentlich, da nach dem Einpressen der Supraleiterdrähte 12 der gesamte Einsatz 8 verdreht wird, so daß sich die ursprünglich geraden Nuten auf dem Einsatz 8 auf der Einsatzmanteloberfläche um die Einsatzachse schrauben. Im Durchführungsbeispiel waren das zwei Einsätze 8 mit 20 mm Durchmesser und einer Einsatzlänge von 1600 mm. Dabei schraubten sich die Nuten etwa zehnmal um die Achse des Einsatzes 8. Das anschließende Glühen der supraleiterdrahtbesetzten Einsätze 8 bewirkt zweierlei: Einerseits die Reaktionsglühung des Supraleiterdrahtes 12, andererseits eine Diffusionsverschweißung des Nb₃Sn mit dem Material des Einsatzes 8. Des weiteren ist am Einsatz 8 dadurch ein guter Strom- und Wärmeübergang hergestellt.

Das Material des normalleitenden Teils des Übergangsstücks und des Einsatzes 8 ist Kupfer, dessen elektrische Leitfähigkeit gegenüber gebräuchlichen Elektrolytkupfer etwas reduziert ist. Dadurch ist auch die Wärmeleitfähigkeit dieses Kupfers nicht so gut. Diese Auswahl geschieht bewußt, da damit weniger Wärme in Richtung supraleitendes Bauteil 5 transportiert wird.

Der konstruktive Aufbau des Übergangsstücks im Bereich der Bohrungen 15 gewährt gute Strom- und Wärmeübergänge und eine örtliche Begrenzung der Wärmeerzeugung ($R I^2$) auf den Bereich, an dem das supraleitende Bauteil 5 mit seinen Drahtenden angeklemt oder angeschraubt wird.

Bezugszeichenliste

- | | | |
|----|---|--|
| 1 | warmes Ende | |
| 2 | Stromversorgung, normal leitendes Bauteil | |
| 3 | Wärmetauscherbereich, Übergangszone | |
| 4 | kaltes Ende | |
| 5 | supraleitendes Bauteil | |
| 6 | normalleitender Bereich | |
| 7 | Supraleiterbereich, Länge | |
| 8 | Einsatz, Träger | |
| 10 | Bohrungsdurchmesser | |
| 11 | Spalt, Zwischenraum | |
| 12 | Supraleiterdraht, Draht | |
| 13 | Stabilisierungskupfer | |
| 14 | Supraleiterfilament | |
| 15 | Bohrung, Bohrloch | |

Patentansprüche

1. Übergang, der ein normalleitendes Bauteil mit einem supraleitenden Bauteil verbindet,
 - bestehend aus einem schlanken, zylinderförmigen Körper aus normalleitendem Material, wobei sich im Betrieb hinsichtlich der Temperatur entlang des Übergangs aufgrund der konstruktiven Einbettung die drei Zonen: warmes Ende, Übergangszone und kaltes Ende ausbilden,
 - am warmen Ende die Zuleitung aus normalleitendem Material und am kalten Ende die Zuleitung aus supraleitendem Material angeschlossen ist,
 - wobei über mindestens die Anschlußlänge der supraleitenden Zuleitung am kalten Ende im Material des Übergangs mindestens eine Bohrung parallel zur Achse des Übergangs besteht, in die ein supraleitender Einsatz eingelassen ist, und der Einsatz zur Bohrlochwand einen guten elektrischen Kontakt hat,

gekennzeichnet durch

- a) der Übergang ist als ein separates Bauteil gestaltet,
- b) die Zuleitung am warmen Ende und am kalten Ende des Übergangs ist lösbar angeschlossen,
- c) der Einsatz besteht aus einem zylinderförmigen Träger aus normalleitendem Material, in dessen Mantelfläche in spiraligen Nuten über die Trägerlänge Supraleiter über die Nutlänge eingelassen sind, und der Einsatz hat höchstens die Länge der Bohrung.

2. Übergangsstück nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Zwischenraum zwischen der Wand der Bohrung (15) und dem darin befindlichen Einsatz (8) mit Lot ausgefüllt ist.
3. Übergangsstück nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Übergangsstück zur Beseitigung des Zwischenraums zwischen der Wand der Bohrung (15) und dem darin befindlichen Einsatz (8) über die Länge der Bohrungen (15) hinweg stranggepreßt oder gehämmert oder gezogen ist.

Claims

1. Junction which connects a normally conducting component part to a superconducting component part,
 - comprising a slim, cylindrical body of normally conducting material, the three zones: hot end,

junction zone and cold end, being provided in operation, in respect of the temperature along the junction because of the structural incorporation,

- the supply line of normally conducting material communicates with the hot end, and the supply line of superconducting material communicates with the cold end, 5
- whereby, over at least the connection length between the superconducting supply line and the cold end, at least one bore parallel to the axis of the junction exists in the material of the junction, in which bore a superconducting insert is provided, and the insert has a good electrical contact with the bore wall, 10 15

characterised in that

- a) the junction is configured as a separate component part,
- b) the supply line detachably communicates with the hot end and the cold end of the junction,
- c) the insert comprises a cylindrical carrier of normally conducting material, in the surface of which carrier superconductors are provided in helical grooves over the length of the carrier over the length of the grooves, and the insert is, at most, as long as the bore. 20 25

2. Junction piece according to claim 1, characterised in that the intermediate space between the wall of the bore (15) and the insert (8) situated therein is filled with solder. 30
3. Junction piece according to claim 1, characterised in that the junction piece is extruded or hammered or drawn over the entire length of the bores (15) to remove the intermediate space between the wall of the bore (15) and the insert (8) situated therein. 35 40

Revendications

1. Jonction reliant une pièce normalement conductrice à une pièce à supraconductivité, 45
 - composée d'un corps cylindrique étroit, en matière usuelle, et pendant le fonctionnement du fait de la température, le long de la jonction, grâce à l'intégration constructive, se trouvent formées trois zones : extrémité chaude, zone transitoire et extrémité froide, 50
 - à l'extrémité chaude est reliée la ligne d'alimentation en un matériau normalement conducteur et à l'extrémité froide est reliée la conduite d'alimentation en matière supraconductrice, 55
 - au moins sur la longueur de raccordement de la ligne d'alimentation supraconductrice, à l'ex-

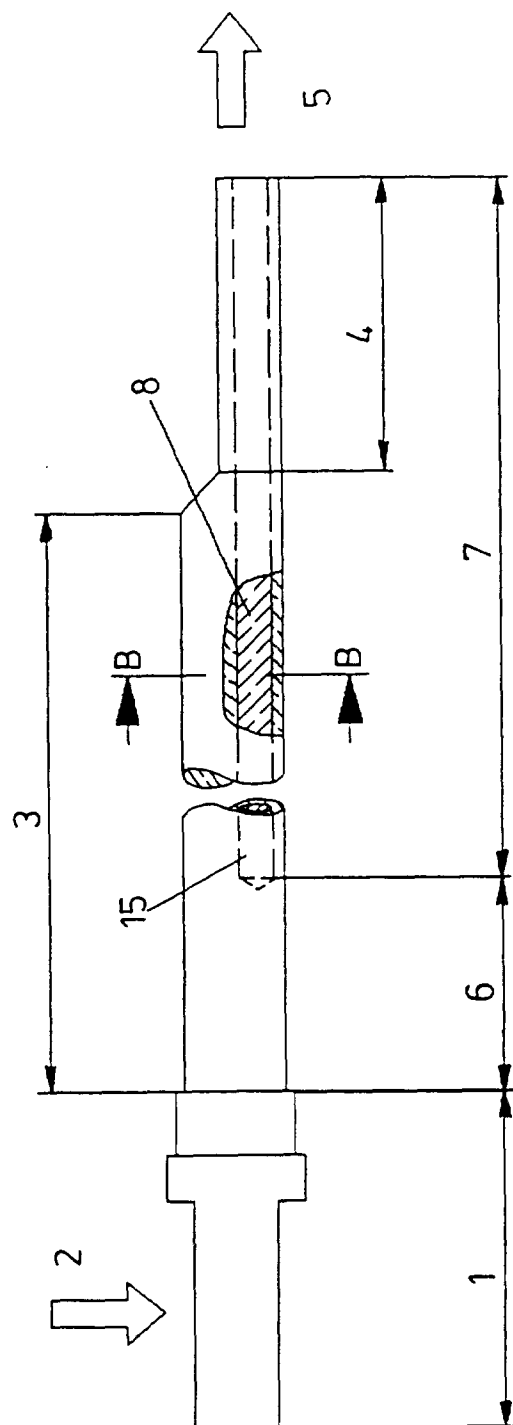
trémité froide, dans le matériau de la jonction, il y a au moins un perçage parallèle à l'axe de la jonction, qui reçoit un insert supraconducteur et cet insert a un bon contact électrique avec la paroi du perçage,

caractérisée en ce que,

- a) la jonction est une pièce séparée,
- b) l'alimentation à l'extrémité chaude et à l'extrémité froide de la transition est reliée de manière amovible,
- c) l'insert se compose d'un support cylindrique en un matériau normalement conducteur et dont la surface enveloppe reçoit dans des rainures en spirale sur la longueur du support, des supraconducteurs insérés dans les rainures et l'insert a au plus la longueur du perçage.

2. Pièce de transition selon la revendication 1, caractérisée en ce que l'intervalle entre la paroi du perçage (5) et l'insert (8) qui s'y trouve est rempli de brasures.
3. Pièce transitoire selon la revendication 1, caractérisée en ce que la pièce transitoire, pour supprimer l'intervalle entre la paroi du perçage (15) et l'insert (8) qui s'y trouve, est extrudée sur toute la longueur du perçage (15) ou est martelée ou est étirée.

Fig. 1



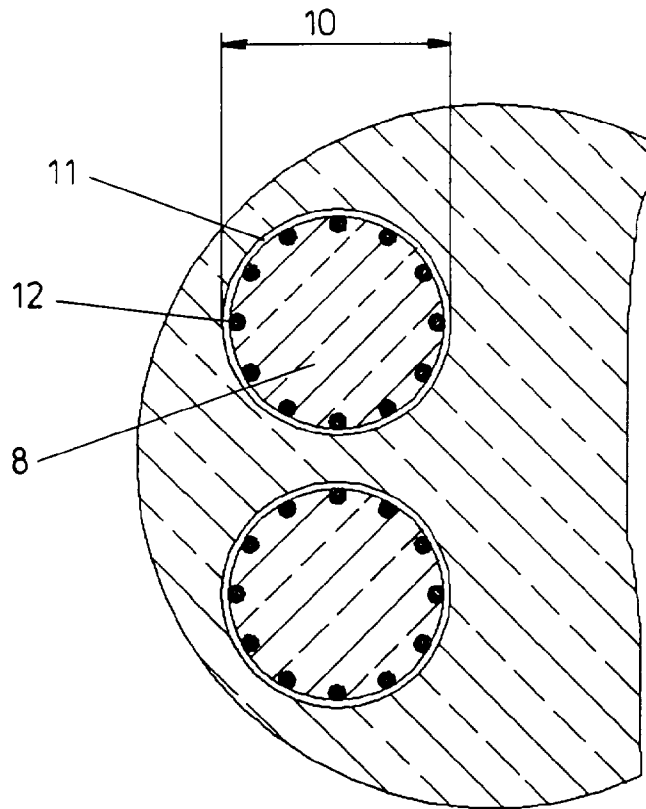


Fig. 2a

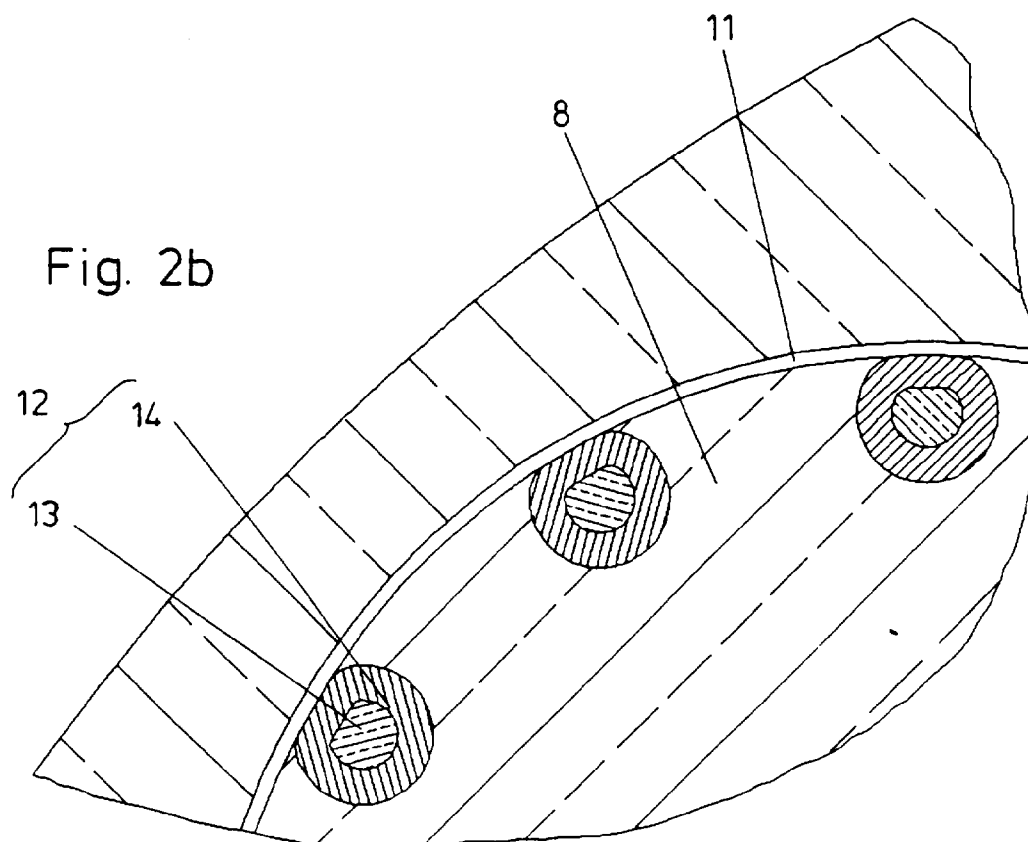


Fig. 2b

Fig. 3

