



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

① CH 656 481 A5

⑤ Int. Cl.⁴: H 01 B 12/02

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ PATENTSCHRIFT A5

⑲ Gesuchsnummer: 387/81

⑳ Anmeldungsdatum: 16.05.1980

③① Priorität(en): 18.05.1979 JP 54-61169

⑳ Patent erteilt: 30.06.1986

④⑤ Patentschrift
veröffentlicht: 30.06.1986

⑦③ Inhaber:
The Furukawa Electric Co., Ltd,
Chiyoda-ku/Tokyo (JP)
Japan Atomic Energy Research Institute,
Minato-ku/Tokyo (JP)

⑦② Erfinder:
Furuto, Yoshio, Tokyo (JP)
Meguro, Shinichiro, Tokyo (JP)
Suzuki, Takuya, Tochigi (JP)
Ito, Ikuo, Tochigi (JP)
Ando, Toshinari, Ibaragi (JP)
Nishi, Masataka, Ibaragi (JP)
Shimamoto, Susumu, Ibaragi (JP)

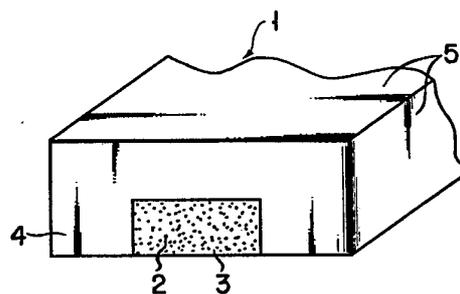
⑦④ Vertreter:
E. Blum & Co., Zürich

⑧⑥ Internationale Anmeldung: PCT/JP 80/00105
(Ja)

⑧⑦ Internationale Veröffentlichung: WO 80/02619
(Ja) 27.11.1980

⑤④ **Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen.**

⑤⑦ Die vorliegende Erfindung betrifft einen Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen, der eine hohe Stromdichte und Stabilität aufweist und geeignet ist als supraleitende Spule für einen grossen supraleitenden Magneten. In einem zusammengesetzten Supraleiter (1) mit supraleitenden Drähten (3) und einem elektrisch und thermisch hoch leitenden, stabilisierenden Metall (4), die in Längsrichtung elektrisch gekoppelt sind, ist auf der Oberfläche des stabilisierenden Metalls (4) eine Schicht (5) aus einer anorganischen Verbindung angeordnet.



PATENTANSPRÜCHE

1. Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen in einem zusammengesetzten Supraleiter mit supraleitenden Drähten und elektrisch sowie thermisch hochleitendem Stabilisierungsmetall, die in der Längsrichtung elektrisch miteinander gekoppelt sind, wobei auf der Oberfläche des stabilisierenden Metalls eine Schicht aus einer anorganischen Verbindung ausgebildet ist.

2. Zusammengesetzter Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass auf der Oberfläche der Schicht aus anorganischer Verbindung ein elektrisch isolierender Abstandshalter angeordnet ist, derart, dass sie teilweise freiliegt.

3. Zusammengesetzter Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das erwähnte stabilisierende Metall an der Oberfläche eine Anzahl Ausnehmungen und Erhebungen aufweist.

4. Zusammengesetzter Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass sich die Ausnehmungen und Erhebungen parallel in der Längsrichtung des Leiters erstrecken.

5. Zusammengesetzter Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das stabilisierende Metall Kupfer und die Schicht anorganischer Verbindung eine Kupferoxidschicht ist.

Die vorliegende Erfindung betrifft einen Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen, der eine grosse Stromdichte zulassen soll und eine hohe Stabilität als Spule für einen grossen supraleitenden Magneten aufweist.

Es ist in der Regel notwendig, die Selbstinduktion eines grossen supraleitenden Magneten, wie er für Kernfusionsreaktoren, magnetohydrodynamische Generatoren (MHD-Generatoren) und supraleitende Energiespeicher Verwendung findet, auf einen geeigneten Wert herabzusetzen. Der Nennstrom muss dabei notwendigerweise ein hoher Strom von über 10 kA sein. Bei einem so grossen supraleitenden Magneten wird aus Gründen der Sicherheit eine hohe Zuverlässigkeit verlangt, und ein zu solchem Zweck verwendeter Supraleiter muss so ausgelegt werden, dass er vollständig stabil ist. Dies bedeutet, dass der Supraleiter so ausgestaltet sein muss, dass er nach Beseitigung eines Zwischenfalls, bei welchem er den supraleitenden Zustand verlässt und in den Widerstandszustand übergeht, in den supraleitenden Zustand zurückzukehren in der Lage ist. Zu diesem Zweck ist eine grosse Menge an stabilisierendem Metall mit dem Supraleiter zusammengeformt. Ein solcher grosser supraleitender Magnet muss ferner eine ausreichende Festigkeit aufweisen, um der grossen elektromagnetischen Kraft zu widerstehen, die auf die Spule wirkt. Es ist deshalb notwendig, den Supraleiter selbst mit einem verstärkenden Material zu versehen. Würde ein grosser Supraleiter einfach auf der Grundlage kleiner oder mittlerer Supraleiter, wie sie bisher zur Verfügung standen, gebaut, so hätte ein solcher Leiter einen extrem grossen leitenden Bereich und eine kleine Stromdichte und könnte wegen der Grösse des supraleitenden Magneten keine geeignete Verwendung bei Kernfusionsreaktoren, MHD-Generatoren usw. finden, da er unökonomisch und unausführbar würde.

Aus diesem Grunde wurden verschiedene andere Supraleitertypen vorgeschlagen, die alle eine grosse Stromdichte zulassen und eine hohe Stabilität sowie eine grosse Widerstandsfähigkeit gegen Belastung aufweisen. Es wurde beispielsweise vorgeschlagen, Aluminium als stabilisierendes Metall mit einem kleinen magnetischen Widerstand bei grossem Magnetfeld zu verwenden. Aluminium weist jedoch eine geringe mechanische Festigkeit auf und zeigt grosse piezoelektrische Widerstandseffekte, weshalb es erforderlich ist, eine Aluminiumschicht mit

einer grossen Menge eines Verstärkungsmaterials zu verbinden, um einer derart zusammengesetzten Struktur eine grosse Widerstandsfähigkeit gegen Belastung zu verleihen. Die Verwendung vom Aluminium als stabilisierendes Metall trägt keineswegs zu einer höheren Stromdichte bei. Als weitere Methode wurde vorgeschlagen, eine Anzahl von Vorsprüngen auf der Oberfläche des stabilisierenden Metalls eines zusammengesetzten Supraleiters auszubilden, z.B. parallele Aussparungen (Längsaussparungen) entlang der Leiterlängsrichtung sowie eine Gruppe von Queraussparungen anzuordnen, die die Längsaussparungen kreuzen, um so die Kühlfläche, welche mit dem Kühlmedium in Kontakt steht, zu vergrössern und die Kühlwirkung der Oberfläche des stabilisierenden Metalls zu verbessern, wodurch die Menge des stabilisierenden Metalls herabgesetzt und die Stromdichte vergrössert wird. Die Kühleigenschaften werden zwar verbessert, wenn solche Ausnehmungen zur Vergrösserung der Kühlfläche im stabilisierenden Metall angeordnet werden. Die Kühleigenschaften verbessern sich aber nicht proportional zur Zunahme der Kühlfläche, sondern es zeigt sich eine Sättigung. Die Anordnung einer grösseren Anzahl solcher Ausnehmungen unter Verkleinerung ihres Abstandes, um damit die Kühlfläche zu erhöhen, erfordert spezielle Bearbeitungseinrichtungen. Die Abnahme der Bearbeitungseffizienz führt zu einer Kostenzunahme. Die grosse elektromagnetische Kraft wird im supraleitenden Zustand über eine Abstandshalteanordnung für die Isolation als Oberflächendruck auf die Leiteroberfläche ausgeübt. Dies führt zur Deformation und zum Brechen der rippenartigen Vorsprünge zwischen den Ausnehmungen, wenn diese dünn sind, womit die Kühlwirkung herabgesetzt wird.

In der japanischen Veröffentlichung 51-132799 ist ein zusammengesetzter, supraleitender, gelitzter Draht mit geringer Stromführungskapazität dargestellt, der in der Regel mit einem indirekten Kühlsystem verwendet wird. Die einzelnen Litzen sind zur elektrischen Isolation gegen benachbarte Litzen mit einer Aluminiumoxidschicht versehen. Dieser Draht ist nicht geeignet zur direkten Kühlung mittels Helium.

Die japanischen Veröffentlichungen 54-114783 und 45-22388 zeigen Supraleiter mit hoher Stromführungskapazität, die mit direkter Kühlung betrieben werden können. Um die Kontaktflächen zum flüssigen Helium zu vergrössern, sind an den Oberflächen Ausnehmungen und Vorsprünge vorgesehen. Es ist indessen kein Hinweis auf die Anordnung einer Schicht aus anorganischem Material an diesen Flächen vorhanden.

In der Veröffentlichung DE-B-1 665 555, welche inhaltlich der US-A-3 428 925 entspricht, wird ein Supraleiter beschrieben, bei welchem eine Schicht aus Aluminiumoxid auf der Leiteroberfläche vorgesehen ist. Diese dient jedoch ebenfalls bloss der elektrischen Isolation. Die Leiteroberfläche gelangt dabei nicht in direkten Kontakt mit dem Kühlmittel.

Keine dieser bekannten Lösungen führt zu einem Supraleiter mit den eingangs erwähnten, angestrebten Eigenschaften.

Es stellt sich damit weiterhin das Problem, einen Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen zu entwickeln, der eine grosse Stromdichte zulässt und eine hohe Stabilität aufweist.

Dieses wird mit einem Supraleiter gemäss Anspruch 1 gelöst. Für zusammengesetzte Supraleiter, bei denen die supraleitenden Drähte und ein Metall mit hoher elektrischer und thermischer Leitfähigkeit, d.h. ein stabilisierendes Metall, in Längsrichtung elektrisch verbunden sind, gelingt es damit ein hohes Stromführungsvermögen zu erzielen.

Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Figuren näher erläutert.

Fig. 1 ist eine perspektivische Ansicht, die ein Beispiel eines zusammengesetzten Supraleiters mit hohem Stromführungsvermögen gemäss der vorliegenden Erfindung zeigt;

Fig. 2 stellt einen Graph dar, der die Wärmestromkurven an der Oberfläche des stabilisierenden Metalls zeigt, welche die Kühleigenschaften des zusammengesetzten Supraleiters mit ho-

hem Stromführungsvermögen gemäss der vorliegenden Erfindung in flüssigem Helium zeigen;

Fig. 3 ist eine perspektivische Ansicht einer Flachspule von ovaler Form, die den erfindungsgemässen zusammengesetzten Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen enthält;

Fig. 4 ist eine perspektivische Ansicht des erfindungsgemässen zusammengesetzten Supraleiters mit hohem Stromführungsvermögen, welcher im Beispiel 2 beschrieben wird;

Fig. 5 ist eine perspektivische Ansicht des erfindungsgemässen zusammengesetzten Supraleiters mit hohem Stromführungsvermögen, welcher im Beispiel 3 beschrieben wird; und

Fig. 6 ist eine Schnittansicht des erfindungsgemässen, zusammengesetzten Supraleiters mit hohem Stromführungsvermögen, welcher im Beispiel 4 beschrieben wird, geschnitten entlang einer Ebene senkrecht zur Längsrichtung des Supraleiters.

Fig. 1 stellt eine perspektivische Ansicht eines zusammengesetzten Supraleiters 1 mit hohem Stromführungsvermögen gemäss der vorliegenden Erfindung dar, wobei eine Anzahl von supraleitenden Drähten 2 in einen Grundkörper 3 aus stabilisierendem Metall eingebettet sind und diese ganze Struktur ihrerseits in Längsrichtung in eine Seite eines Streifens 4 aus stabilisierendem Metall eingebettet ist. Auf der Oberfläche des Streifens 4 aus stabilisierendem Metall ist eine Schicht 5 einer anorganischen Verbindung angeordnet. Der zusammengesetzte Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen besitzt einen relativ einfachen Aufbau. Die thermische Leitfähigkeit in flüssigem Helium ist stark verbessert, so dass eine hohe Stabilität und eine hohe Stromdichte erzielt werden.

Die verwendeten supraleitenden Drähte sind Drähte oder Fäden aus supraleitenden Legierungen wie Nb-Ti oder Nb-Zr oder supraleitenden Verbindungen wie Nb₃Sn oder V₃Ga. Dabei ist eine Anzahl supraleitender Drähte in eine Matrix eines stabilisierenden Metalls wie Kupfer oder Aluminium eingebettet oder aber längsseits des Grundkörpers aus stabilisierendem Metall angeordnet. Die Struktur, in welcher die supraleitenden Drähte und das stabilisierende Metall elektrisch und mechanisch zusammengeschlossen sind, wird allgemein als zusammengesetzter Supraleiter bezeichnet. Zur Herstellung eines relativ kurzen, zusammengesetzten Supraleiters wird ein zusammengesetzter Barren, der sich durch Einbettung einer bestimmten Zahl supraleitender Stangenkörper in einen Körper aus stabilisierendem Metall ergibt, auf kleinen Durchmesser stranggepresst. Zur Erzielung eines langen, zusammengesetzten Supraleiters wird zunächst ein langer, supraleitender Draht mit kleinem Durchmesser durch Strangpressen oder Ziehen usw. gebildet. Mehrere solcher Drähte werden verdreht und können durch Walzbearbeitung usw. zusammengeschlossen werden. Sie werden an den Streifen aus stabilisierendem Metall gelötet und bilden mit diesem eine Einheit, womit sich ein langer zusammengesetzter Supraleiter ergibt. Die Konstruktion, die Ausbildung und das Herstellungsverfahren des zusammengesetzten Supraleiters bleiben dabei im einzelnen frei.

Die Oberfläche des stabilisierenden Metalls des zusammengesetzten Supraleiters ist durchgängig mit einer Schicht einer anorganischen Verbindung, wie einem Oxid oder einem Sulfid des stabilisierenden Metalls bedeckt. Es kann auch ein Metall, das eine Schicht einer anorganischen Verbindung von sehr guter thermischer Leitfähigkeit bildet, durch Platieren auf der Oberfläche des stabilisierenden Metalls ausgebildet werden. Die Metalloberfläche wird hernach oxidiert oder vulkanisiert zur Bildung eines Oxides oder Sulfides. Insbesondere wird bei Kupfer als stabilisierendem Metall eine Nickelschicht gebildet und deren Oberfläche oxidiert zur Bildung einer Schicht aus Nickeloxid. Bei Aluminium als stabilisierendem Metall wird eine Kupferschicht aufgebracht und deren Oberfläche oxidiert zur Bildung einer Schicht aus Kupferoxid.

Zur Bildung solcher anorganischer Verbindungen sind chemische Behandlungsverfahren, wie z.B. Behandlung mit Chrom-

säure, Kaliumpermanganat und Ebonol, möglich, um eine Schicht, bestehend aus einer Mischung von Kupferoxid und Kupfersuboxid zu erhalten. Mit diesen Verfahren wird eine Oxidschicht mit einer körnigen, geschichteten Struktur gebildet mit einer Teilchengrösse von 0.05 bis 1 µm und einer Schichtdicke von 0.3 bis 3µm. Mit Elektrolyse kann ein Oxid in einer körnigen, geschichteten Struktur mit einer grösseren Teilchenabmessung und Schichtdicke erzielt werden, als dies beim chemischen Behandlungsverfahren der Fall ist. Das Verfahren unter Einbezug der Elektrolyse ist hinsichtlich der Wärmeübertragungseigenschaften vorzuziehen. Eine Schicht aus einer Mischung von Kupfersulfid und Kupferoxid kann mittels dem chemischen oder dem elektrolytischen Behandlungsverfahren in einer Dicke zwischen einigen und 20 µm erzeugt werden. Zur Bildung einer Alunitschicht auf der Oberfläche von Aluminium ist es vorteilhaft, eine elektrolytische anodische Oxidation bei einer hohen Spannung (50 bis 200 V) in einem Schwefelsäure- oder Oxalsäurebad vorzunehmen, was einen relativ grossen Zelldurchmesser (etwa 1 µm) und eine relativ grosse Dicke (10 bis 50 µm) ergibt. Eine Behandlung zum Schliessen der Poren, die allgemein zur Verbesserung der Korrosions- und Spannungsfestigkeit führt, ist nicht von Vorteil, da dies die Wärmeübergangseigenschaften verschlechtert.

Die anorganische Verbindung, die auf dem stabilisierenden Metall angeordnet ist, ist in ihrer mikroskopischen Kristallstruktur körnig mit einer geeigneten Teilchengrösse, wobei die Teilchen zu geeigneter Dicke geschichtet sind.

Die Wirkungen der Schicht aus anorganischem Material auf die Kühleigenschaften der Oberfläche des stabilisierenden Metalls in flüssigem Helium wurden getestet. Die Ergebnisse werden anhand von Fig. 2 erläutert.

Der Test wurde wie folgt ausgeführt.

Ein Kupferblock von 13 mm Dicke, 21 mm Breite und 50 mm Länge wurde als Probe verwendet. Ein Heizdraht aus Chromnickel und ein Ge-Thermometer wurden in die Probe eingebettet und diese wurde in flüssiges Helium eingetaucht, wobei die Längsrichtung der Probe vertikal war. Die Heizleistung wurde in konstantem Mass von Null an erhöht, wobei gleichzeitig der Temperaturanstieg der Probe mit dem Ge-Thermometer gemessen wurde. Die erhaltenen Siedekurven sind in Fig. 2 gezeigt, wobei der Wärmefluss, erhalten durch Division der Heizleistung mit der Wärmeübergangsfläche, längs der Ordinate und die Differenz zwischen der Temperatur jeder Probe und dem flüssigen Helium (4.2°K) längs der Abszisse aufgetragen ist.

Zwei Flächen von 21 mm Breite und 50 mm Länge wurden als Wärmeübergangsflächen des Versuchsstücks angenommen, während die anderen vier Flächen mittels Bakelit thermisch isoliert wurden. Als typisches Beispiel der Fläche mit Ausnehmungen wurden zehn in Längsrichtung laufende Ausnehmungen, je 1 mm breit und 1,5 mm tief, in 1-mm-Abständen pro eine Fläche angebracht, so dass alles in allem 20 Ausnehmungen an beiden Flächen des Versuchsstücks vorlagen. Als chemische Behandlung zur Bildung einer Schicht aus Kupferoxid an den Wärmeübergangsflächen wurde eine Ebonolbehandlung gewählt. In Fig. 2 ist der Übergangswärmestrom (qt) der Wärmefluss beim Übergang vom Zustand des Blasensiedens zum Zustand des Filmsiedens des flüssigen Heliums. Der Rückbildungswärmestrom (qr) ist der Wärmestrom bei der Rückkehr aus dem Zustand des Filmsiedens in denjenigen des Blasensiedens. Sowohl qt als auch qr sind vorteilhafterweise hoch für die Kühleigenschaften des Supraleiters.

Wie aus Fig. 2 entnommen werden kann, ist bei der Wärmestromkurve A, bei welcher die Schicht aus Kupferoxid auf der Fläche des Grundmaterials Kupfer als stabilisierendes Metall gebildet ist, der Übergangswärmestrom qt_a um etwa 20% höher als qt_b und der Rückbildungswärmestrom qr_a ist bezüglich qr_b

leicht erhöht im Vergleich mit der Wärmestromkurve B, die den Fall betrifft, wo keine Kupferoxidschicht vorhanden ist.

Bei der Wärmestromkurve C, welche den Fall betrifft, wo auf der Oberfläche des Kupfergrundmaterials Ausnehmungen gebildet sind und die Kupferoxidschicht vorhanden ist, liegt der Übergangswärmestrom qt_c um etwa 20% über qt_d und der Rückbildungswärmestrom qr_c ist um mehr als 60% höher als qr_d , wobei die Wärmestromkurve D den Fall betrifft, wo die Ausnehmungen vorhanden sind, jedoch die Kupferoxidschicht fehlt.

Es wird angenommen, dass der Umstand des stark verbesserten Übergangs- und Rückbildungswärmestroms beim Vorliegen von Ausnehmungen auf der Oberfläche des stabilisierenden Metalls und der Schicht aus einer anorganischen Verbindung im Vergleich mit dem Fall, wo nur Ausnehmungen vorhanden sind, auf synergetische Effekte der Ausnehmungen mit der Schicht aus einer anorganischen Verbindung zurückzuführen ist. Dies kann ferner durch die Tatsache gestützt werden, dass der Zuwachs (ca. 60%) des Rückbildungswärmestroms bei Vorliegen der anorganischen Schicht auf der mit Ausnehmungen versehenen Oberfläche des stabilisierenden Metalls viel grösser ist, als der Zuwachs (ca. 10%) des Rückbildungswärmestroms (qr) bei Anordnung der Schicht aus anorganischen Verbindungen auf der Oberfläche des stabilisierenden Metalls. Obschon diese Erscheinung noch nicht geklärt ist, wird im gegenwärtigen Zeitpunkt angenommen, dass die Schicht aus anorganischer Verbindung auf der Oberfläche des stabilisierenden Metalls eine körnige, geschichtete, mikroskopische Struktur aufweist und der Übergangswärmestrom (qt) wegen der Vergrößerung der Anzahl von Keimzentren im Blaseniedebereich zunimmt. Die Zunahme des Rückbildungswärmestroms (qr) wird der Trennung der Blasen des gasförmigen Heliums von der stabilisierenden Metalloberfläche zugeschrieben, welche durch den Einfluss des körnigen, geschichteten Materials und der Wirkung der Ausnehmungen beschleunigt wird.

Überraschende Effekte werden durch Ausbildung einer Anzahl Ausnehmungen, wie z.B. Gruben, sowie Wölbungen auf der Oberfläche des stabilisierenden Metalls sowie durch Ausbildung einer Schicht einer anorganischen Verbindung erzielt. Obschon sowohl der Übergangswärmestrom (qt) als auch der Rückbildungswärmestrom (qr) verbessert werden, ist die Verbesserung beim Rückbildungswärmestrom (qr) besonders gross, was zur Verbesserung der Eigenschaften des Supraleiters beiträgt. Wenn der Supraleiter vom supraleitenden Zustand in den ohm'schen Zustand wechselt, wird im Leiter ein elektrischer Widerstand erzeugt, so dass Joule'sche Wärme entsteht. Der Supraleiter kann in seinen supraleitenden Zustand zurückkehren, wenn die Kühlgeschwindigkeit des flüssigen Heliums gross genug ist, d.h. wenn der Betrag der Wärmeabfuhr grösser ist als derjenige der auf diese Weise erfolgten Wärmezeugung. Als Bedingung zur Rückkehr in den supraleitenden Zustand ist die

folgende Beziehung bekannt:
$$I_r = \sqrt{qr PA/\rho}$$

worin I_r der Rückkehrstrom (der Supraleiter kann nicht in den supraleitenden Zustand zurückkehren, wenn ein Strom fliesst, der grösser ist als dieser), qr der Rückbildungswärmestrom, wie oben erläutert, P die Umfangslänge des Schnitts senkrecht zur Supraleiterlängsrichtung (gewöhnlich Umfang genannt), A die Schnittfläche eines Schnitts senkrecht zur Supraleiterlängsrichtung und ρ der spezifische elektrische Widerstand des Supraleiters im ohm'schen Zustand ist. Wie dieser Beziehung entnommen werden kann, steigt bei Zunahme des Rückbildungswärmestroms (qr) der Rückkehrstrom I_r ebenfalls, und zwar proportional zum Quadrat von qr , so dass die Eigenschaften des Supraleiters verbessert werden. Demzufolge ist es beim Rückkehrstrom I_r möglich, die Querschnittsfläche A des Leiters kleiner zu machen durch Vergrößerung von qr beim selben Supra-

leiter, so dass die Menge stabilisierenden Metalls herabgesetzt und die Stromdichte des Leiters verbessert werden kann.

Obschon die Gestalt der Ausnehmungen und Erhebungen auf der Oberfläche des stabilisierenden Metalls des zusammengesetzten Supraleiters nicht speziell beschränkt ist, sind verschiedene Querschnittsformen, wie sie durch allgemeine Verfahren zum Herstellen von Ausnehmungen entstehen, ökonomisch ausführbar. Beispielsweise können rechteckige Ausnehmungen, die keine spitzwinkligen Vorsprünge aufweisen, wie sie beim obigen Versuch verwendet wurden, und für sich allein unwirksam zur Verbesserung der Wärmeübergangseigenschaften bleiben, in Kombination mit der Schicht aus anorganischer Verbindung mit ausgezeichnetem Effekt verwendet werden. Da die Ausnehmungsform nicht komplex ist, können die Ausnehmungen in einem plastischen Bearbeitungsverfahren geformt werden, das für Massenproduktion des länglichen Leiters geeignet ist, ohne dass spezielle Bearbeitungsverfahren verwendet werden müssen. Da ferner zwischen den Ausnehmungen keine spitzwinkligen Vorsprünge vorhanden sind, wird der Oberflächendruck, der durch den Isolationsabstandshalter auf den Leiter ausgeübt wird, wenn die Spule erregt ist, von einer flachen Oberfläche als ganzes aufgenommen, so dass die Verformung der Ausnehmungen wegen dem Oberflächendruck im wesentlichen verhindert wird, wodurch eine Spule geschaffen wird, die widerstandsfähig ist gegen elektromagnetische Kräfte. Obschon es vorteilhaft ist, die Ausnehmungen in Längsrichtung des Supraleiters auszurichten, um den elektrischen Widerstand des stabilisierenden Metalls herabzusetzen und um die Herstellung des Supraleiters zu erleichtern, können Querausnehmungen senkrecht oder schiefwinklig zu den Längsausnehmungen ausgebildet werden oder die Drähte können zur Vergrößerung der Oberfläche geriffelt werden.

Der zusammengesetzte Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen wird vorwiegend in Spulen für supraleitende Magnete verwendet. Deshalb ist es notwendig, dass die anorganische Schicht auf der Oberfläche des stabilisierenden Metalls in direktem Kontakt mit dem flüssigen Helium ist, um durch dieses direkt gekühlt zu werden. Da der Supraleiter k , z.B. wie in Fig. 3 dargestellt, als Flachspule mit ovaler Form ausgebildet ist, müssen die Windungen und die Schichten elektrisch isoliert sein. Wie in Fig. 3 gezeigt, sind elektrisch isolierende Abstandshalter 6 zwischen den Windungen der Spule und elektrisch isolierende Abstandshalter 7 zwischen den Schichten der Spule angeordnet. Da jedoch die Schicht aus anorganischen Verbindungen auf dem stabilisierenden Metall das flüssige Helium so wirksam wie möglich direkt berühren muss, ist es notwendig, den Anteil der durch die Abstandshalter bedeckten Schicht kleiner zu machen. Demzufolge sind die Abstandshalter in geeigneten Intervallen angeordnet. Mit einer solchen Konstruktion ergeben die einzelnen Abstandshalter Kanäle für das flüssige Helium, wenn die Flachspulen gegenseitig übereinander angeordnet werden (in Fig. 3 sind der Einfachheit halber nur zwei Schichten gezeigt). Es ist vorteilhaft, diese Abstandshalter schief anzuordnen, wie in Fig. 3 dargestellt, so dass die auf der Oberfläche des Leiters erzeugten Heliumblasen wirksam freigegeben und entlassen werden können.

Es ist von Vorteil, einen zusammengesetzten Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen so anzuordnen, dass er nicht in direktem Kontakt mit den benachbarten Supraleitern steht, damit er über den grössten Flächenbereich mit dem flüssigen Helium in Kontakt ist. Demzufolge ist es vorteilhaft, die Schichten mit Abstandhaltern oder ähnlichem elektrisch zu isolieren, selbst wenn die anorganischen Schichten auf den Oberflächen des stabilisierenden Metalls ausreichend elektrisch isolieren.

Die vorliegende Erfindung wird nunmehr unter Bezugnahme auf ihre Ausführungsbeispiele beschrieben.

Beispiel 1

Die Abmessungen des Leiters waren 7 mm × 7 mm. Das Querschnittsflächenverhältnis (Cu/SC) von Kupfer zu Nb-Ti des Leiterquerschnittes war 8. Ein supraleitender, flacher, rechteckiger Draht wurde mittels 1180 Nb-Ti-Filamenten von je 80 µm Durchmesser hergestellt, die in eine Kupfermatrix eingebettet wurden. An der Oberfläche des Kupfers des Leiters wurde eine Ebonol-Behandlung (Eintauchen in eine Lösung von 100 g/l NaClO₂ und 100 g/l NaOH bei 70 bis 80°C für einige Minuten) vorgenommen. Eine Flachspule mit 14 Windungen und 200 mm innerem sowie 300 mm äusserem Durchmesser wurde hergestellt, ohne irgendein Isolationsband zwischen die Windungen der Spule zu kleben. Die Spule wurde in einen Vormagnetisierungsmagneten eingesetzt. Der kritische Strom wurde in einem Vormagnetisierungsfeld von 7 T gemessen, und es ergab sich ein Wert von 4600 A. Dieser Wert entspricht dem kritischen Strom des kurzen Versuchsstücks innerhalb eines Fehlerbereiches von 1 bis 2%. Als nächstes wurde Strom durch die Flachspule geschickt, nachdem ein Heizdraht in diese eingesetzt und ein Teil des Leiters gezwungen wurde, in den Widerstandszustand überzugehen. Die Vergrößerung oder die Schrumpfung des Widerstand aufweisenden Teils wurde gemessen. Der flächentreue Wärmestrom q_e wurde erhalten mit 0.36 W/cm². Dies stellt eine Verbesserung von 20 bis 40% bezüglich q_e (0.25 bis 0.30 W/cm²) im Fall der generell unbehandelten Kupferoberfläche dar. Während diesem Test erfolgte die Kühlung des Leiters durch beide Seitenflächen des Leiters. Die mechanische Festigkeit wurde durch die Ebonolbehandlung nicht beeinträchtigt und war hoch, 36.4 kg/mm² für die Zugfestigkeit und 27.0 kg/mm² für die 0.2 Dehngrenze, beides bei Zimmertemperatur.

Beispiel 2

Fünfzehn zusammengesetzte, supraleitende Feindrähte a (Leiter mit einem Cu/Sc Verhältnis von 2.0 mit 2300 Nb-Ti-Filamenten von 18 µm Durchmesser, eingebettet in sauerstofffreies Kupfer von 1.5 mm Durchmesser, wurden gelitzt und zu einer flachen, rechteckigen Form gewalzt, womit ein geformter Litzendraht b entstand, dessen Oberfläche danach mit Pb-Sn-Lötlutmittel überzogen wurde, wie in Fig. 4 dargestellt. Auf der einen Seite eines Kupferbandes 4 mit der Abmessung 5 mm × 20 mm als stabilisierendes Metall wurden elf Ausnehmungen 9 von 0.7 mm Breite und 1 mm Tiefe in der Längsrichtung und Querausnehmungen 10 von 0.7 mm Breite und 1 mm Tiefe in 1-mm-Abständen senkrecht zu den längsverlaufenden Ausnehmungen in ähnlicher Weise angeordnet. An der mit Ausnehmungen versehenen Fläche wurde eine chemische Behandlung (Eintauchen in ein Bad von 8 g/l Kaliumpermanganat und 60 g/l Schwefelsäure bei 70 bis 80°C) vorgenommen zur Ausbildung einer Kupferoxidschicht. Zwischen zwei solche Kupferstreifen 4 wurde das geformte Litzenkabel 6 eingelötet, wie in Fig. 4 gezeigt, so dass ein eingebetteter, zusammengesetzter Supraleiter 1 entstand. Unter Verwendung des Leiters 1 wurde ein Abstandshalter 6 (der 50% der gesamten Fläche bedeckte) auf der mit Ausnehmungen versehenen Oberfläche des Leiters angeordnet, welcher schiefwinklige Ausschnitte 11 aufwies, wie in Fig. 4 gezeigt. Der Leiter wurde um einen fiberglasverstärkten Kunststoffspulenkern von 200 mm Aussendurchmesser gewickelt zur Bildung einer Magnetspule. Diese Spule wurde in einen Vormagnetisierungsmagneten eingesetzt, und es wurde unter einem Magnetfeld von 8 T Strom hindurchgeschickt. Es ergab sich ein kritischer Strom von 5600 A. Dies entspricht dem kritischen Strom des kurzen Versuchsstücks mit einem Fehler im Bereich von 1 bis 2%. Danach wurde ein Test für den Übergang vom supraleitenden in den ohm'schen Zustand ausgeführt, wobei zuvor ein Heizdraht in den geformten Litzendraht eingebettet wurde. Es ergab sich ein hoher flächentreuer Wärmefluss von $q_e = 0.92$ W/cm². Der Grund, weshalb solche gute Eigenschaften erzielt wurden, obschon 50% der Wärmeüber-

gangsfläche vom Abstandshalter bedeckt waren, ist teilweise dem Umstand zuzuschreiben, dass die Wärmeübergangseigenschaften der Leiterfläche wegen der Kombination von chemischer Behandlung und Anordnung von Ausnehmungen stark verbessert werden. Zusätzlich zu diesem Grund sind folgende Ursachen sehr plausibel. Der Wärmeübergang der durch die Abstandshalter bedeckten Fläche wird in der Regel stark herabgesetzt im Vergleich mit demjenigen, der mit exponierter Oberfläche erzielt wird. Da jedoch die Oberfläche des Leiters des vorliegenden Beispiels eine Anzahl von Ausnehmungen 9 aufweist, sind auch unter dem Abstandshalter Kanäle für flüssiges und/oder gasförmiges Helium vorhanden. Es wird angenommen, dass die geringe Verschlechterung der so erhaltenen Wärmeübergangseigenschaften beiträgt zur Erzielung der guten Wärmeübergangseigenschaften.

Beispiel 3

Wie in Fig. 5 gezeigt, wurden längliche Ausnehmungen in jeder der zwei grösseren Flächen des Kupferstreifens 4, der das stabilisierende Metall darstellt, sowie eine tiefe Längsnut 12 an einer der anderen Seitenflächen angeordnet. Die supraleitenden, geformten Nb-Ti-Litzendrähte b wurden durch Löten in die Nut 12 eingelegt zur Herstellung eines zusammengesetzten Supraleiters 1 von 200 m Länge. Der geformte Nb-Ti-Litzendraht b wurde durch Verlitzen und Pressen von fünfzehn der zusammengesetzten Feindrähte a, die 1270 Nb-Ti-Filamente von 50 µm Durchmesser eingebettet in sauerstofffreies Kupfer aufweisen, erhalten, wie in Beispiel 2. Der Kupferstreifen 4 als stabilisierendes Metall ist 27 mm breit und 12.8 mm dick und besitzt 22 Längenausnehmungen 9 von 1 mm Breite und 1.5 mm Tiefe auf der oberen und der unteren Seite. Der Kupferstreifen 4 hat ferner an seiner Seitenfläche eine Nut 12 von 5 mm Breite und 17 mm Tiefe zum Einsetzen der geformten Litzendrähte b. Es wurde mit Ausnahme der Nut 12 dieselbe chemische Behandlung vorgenommen, wie im Beispiel 2, um eine Schicht aus Kupferoxid auf der Oberfläche des Kupferstreifens 4 zu bilden. Die innere Fläche der Nut 12 des Kupferstreifens 4 wurde vorgängig mit Lötlutmittel überzogen, und die geformten Litzendrähte wurden darin eingesetzt. Diese wurden durch andauerndes Erwärmen und Löten zu einem Ganzen geformt. Vom so erhaltenen zusammengesetzten Supraleiter 1 wurde ein kurzes Muster von 1 m Länge genommen und die Wärmeübergangseigenschaften von der mit Ausnehmungen versehenen Oberfläche 9 ins flüssige Helium wurden bestimmt. Es wurden hohe Wärmeströme von 1.04 W/cm² für den Übergangswärmestrom (q_t) und von 0.88 W/cm² für den Rückbildungswärmestrom (q_r) erhalten. Eines der speziellen Merkmale des zusammengesetzten Supraleiters 1 gemäss diesem Beispiel ist, dass, bevor die geformten Nb-Ti-Litzendrähte b und der Kupferstreifen 4 durch Löten vereinigt werden, eine Ebonolbehandlung auf dem Kupferstreifen 4 ausgeführt wird, mit Ausnahme der Stellen, die für das Löten benötigt werden. Dadurch werden die Wärmeübergangseigenschaften verbessert und das Haftens des Lötlutmittels an den Wärmeübergangsflächen während dem Lötprozess wird verhindert, so dass eine ausreichende Menge an Lötlutmittel zum Löten zugeführt werden kann, und es möglich ist, mit einer sehr geringen Anzahl von Poren zu löten. Ferner wird die Nachbearbeitung zum Entfernen des an unerwünschten Stellen haftenden Lötlutmittels, z.B. durch Schleifen, überflüssig, so dass das ganze Verfahren abgekürzt werden kann. Danach wurden an der kurzen Probe Messungen des kritischen Stroms ausgeführt. Die Messung des zusammengesetzten Supraleiters 1 erfordert eine grosse Stromquelle mit einer Kapazität von über 20 kA. Wegen der Beschränkungen, die durch die Testeinrichtung gegeben waren, wurden Proben von 50 cm der einzelnen zusammengesetzten, supraleitenden Feindrähte a genommen und hinsichtlich des kritischen Stroms untersucht. Der mittlere kritische Strom betrug 1360 A bei einem Magnetfeld von 8 T.

Gestützt auf dieses Ergebnis, wurde der kritische Strom des zusammengesetzten Supraleiters 1 insgesamt zu 20 400 A berechnet bei einem Magnetfeld von 8 T. Die Zugfestigkeit war 35.8 kg/mm², die 0.2 Dehngrenze 25.7 kg/mm² und die Bruchdehnung war 18.3%. Demzufolge wurde keine Verschlechterung der mechanischen Festigkeit wegen der chemischen Behandlung festgestellt.

Beispiel 4

Zwei Profilkupferstreifen 4 wurden als stabilisierendes Metall mit Lötmitteln 17 an beiden Seiten eines flachen, rechtwinkligen Nb₃Sn-Leiters 18 angebracht, wie in Fig. 6 dargestellt, um einen zusammengesetzten Supraleiter 1 mit den Massen 6.6 mm × 8.4 mm und 10 m Länge zu bilden. Die Struktur des Leiters war wie folgt: Der flache rechteckige Nb₃Sn-Leiter 18 war 8.4 mm breit und 2 mm dick. Eingebettet in den flachen rechteckigen Leiter 18 waren 116 000 Nb-Filamente 15 von je 5 µm Durchmesser, umgeben von einer Nb₃-Sn-Schicht, die durch Diffusionswärmebehandlung gebildet wurden, wobei die Filamente mit einer Ganghöhe von 90 mm verdreht in einer Matrix von Cu-Sn-Bronze 16 angeordnet waren. Der Leiter 18 wies ferner eine Kupferschicht 13 auf, die 15% der Querschnittsfläche der Aussenseite der Matrix über einer Ta-Schicht 14 von 120 µm einnahm, welche als Diffusionssperre vorgesehen ist. Der Kupferstreifen 4 war 8.4 mm breit und 2.3 mm dick und hatte beidseitig je einen Absatz 9 der Grösse 1 mm × 1 mm, der sich durchgängig in Längsrichtung erstreckte. Auf diese Weise entstanden durch das Anlöten zwei solcher Kupferstreifen an beide Seiten des flachen, rechteckigen Nb₃Sn-Leiters in Längsrichtung vier durchgängige Ausnehmungen 9 von 1 mm Breite und 1 mm Tiefe zur Kühlung des Leiters. Auf dem zusammengesetzten Supraleiter 1 wurde in einem Bad eine durchgehende Ebonol-Behandlung vorgenommen, um über der gesamten Leiteroberfläche eine Schicht aus Kupferoxid zu bilden. Unter Verwendung dieses zusammengesetzten Supraleiters 1 wurde eine Flachspule mit 300 mm Innendurchmesser, 385 mm Aussendurchmesser und 10 Windungen hergestellt und in einen vormagnetisierenden Magneten eingesetzt. Ein Magnetfeld von 10 T wurde angelegt und der kritische Strom wurde zu 4500 A gemessen. Mittels eines vorgängig in die Löttschicht 17 eingebetteten Heizdrahtes wurde ein Testübergang vom supraleitenden in den ohm'schen Zustand ausgeführt und ein flächentreuer Wärmestrom (qe) von 0.55 W/cm² erhalten.

Mit dem erfindungsgemäss ausgestalteten Supraleiter lassen sich deshalb die folgenden Effekte erhalten:

- (1) Die Stabilität des Supraleiters und die totale Stromdichte als Spule wurden stark verbessert, da die Wärmeübergangseigenschaften zum flüssigen Helium ausgezeichnet sind.
 - (2) Der Supraleiter kann mit extrem niedrigem Kostenaufwand hergestellt werden, da die Bereitstellung des stabilisierenden Metalls einfach, die plastische Bearbeitung rationell und die durchgehende chemische Behandlung mit einer einfachen Vorrichtung möglich ist.
 - (3) Im Fall eines Leiters mit Ausnehmungen an der Kühlfläche ist die Verschlechterung der Kühleigenschaften klein, da die Ausnehmungen unter den Abstandshaltern als Kanäle für das flüssige und/oder gasförmige Helium dienen, selbst wenn der Abstandshalter die Wärmedurchgangsflächen bedeckt.
 - (4) Da mittels einer einfachen Ausnehmungskonfiguration gute Wärmedurchgangseigenschaften erzielt werden, wird ein ebener Kontakt mit den Abstandshaltern und eine grössere Kontaktfläche geschaffen und der Supraleiter ist stabil gegen Oberflächendruck.
 - (5) Wenn die Ausnehmungen in Längsrichtung durchgehend sind, ist der Zuwachs des elektrischen Widerstands wegen der Herabsetzung der Querschnittsfläche des Leiters zufolge der Ausbildung der Ausnehmungen klein, was zu einem hinsichtlich der Stabilität vorteilhaften, zusammengesetzten Supraleiter führt.
 - (6) Wenn eine Schicht einer anorganischen Verbindung auf der Oberfläche des stabilisierenden Metalls mit Ausnahme des Lötbereichs angeordnet wird und erst nachher im Herstellungsverfahren des zusammengesetzten Supraleiters durch Löten die Vereinigung zu einem Stück erfolgt, kann das Anhaften des Lötmittels an der Kühlfläche verhindert und es können gute Wärmeübergangseigenschaften erzielt werden, wobei zugleich das Verfahren abgekürzt wird. Damit ergibt sich ein zusammengesetzter Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen, der zur Verwendung als Supraleiter für einen grossen supraleitenden Magneten geeignet ist, z.B. in einem Kernfusionsreaktor, einem magnetohydrodynamischen Generator oder einem supraleitenden Magnetenergiespeicher usw.
- Der zusammengesetzte Supraleiter mit hohem Stromführungsvermögen hat stark verbesserte Kühleigenschaften in flüssigem Helium, so dass die Menge an benötigtem stabilisierendem Metall herabgesetzt und eine grössere Stromdichte erzielt werden kann.

FIG. 1

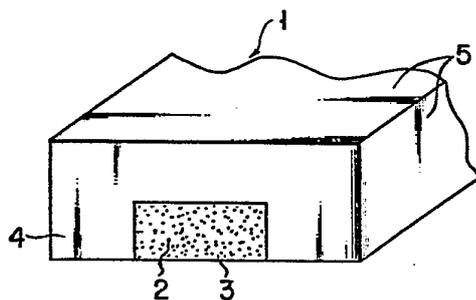


FIG. 2

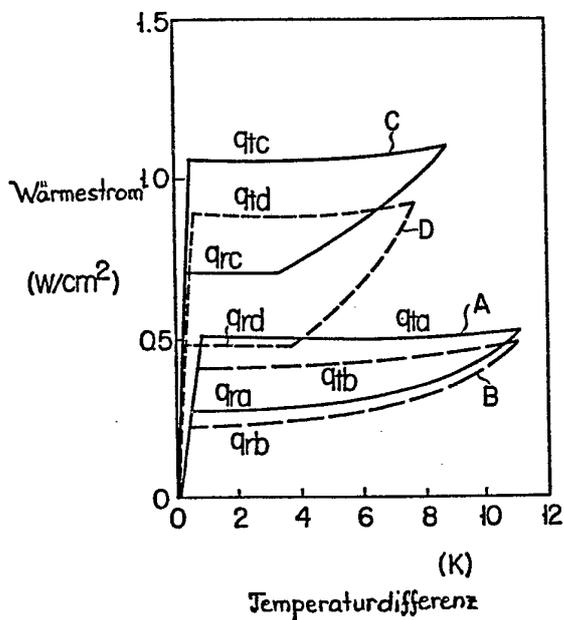
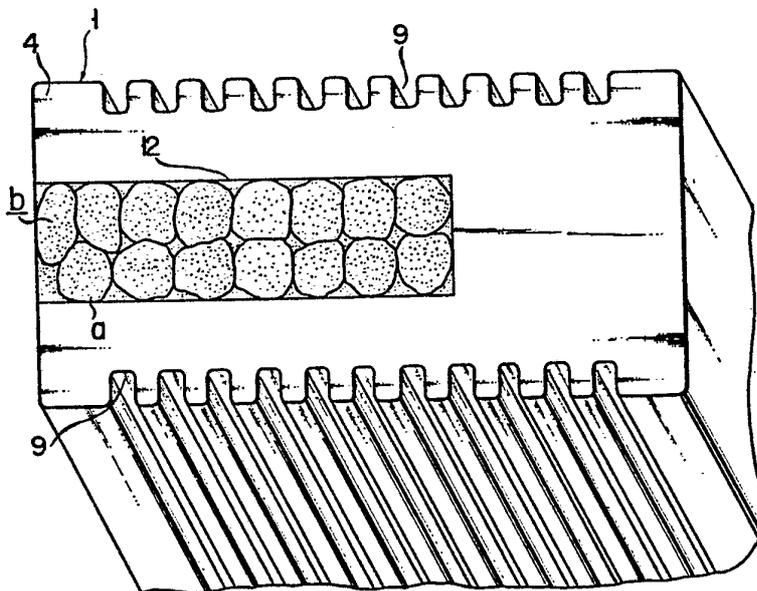


FIG. 5



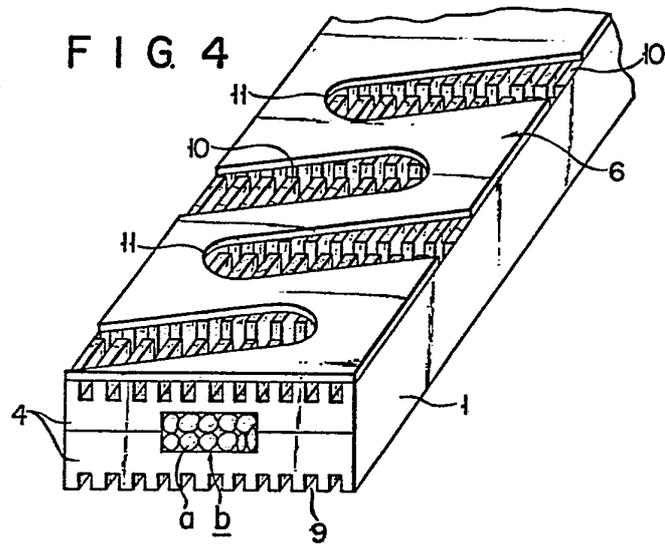
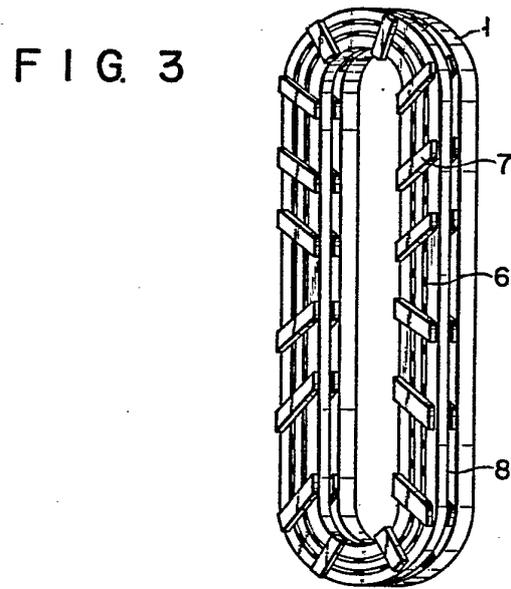


FIG 6

