

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
H01F 6/02 (2019.02)

(21) (22) Заявка: 2017106802, 28.08.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
28.08.2015Дата регистрации:
16.04.2019

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
01.09.2014 FI 20145755

(43) Дата публикации заявки: 03.10.2018 Бюл. № 28

(45) Опубликовано: 16.04.2019 Бюл. № 11

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 03.04.2017(86) Заявка РСТ:
EP 2015/069716 (28.08.2015)(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2016/034503 (10.03.2016)Адрес для переписки:
107061, г. Москва, ул. Преображенская пл., д.
6, ООО "Вахнина и Партнеры"

(72) Автор(ы):

СОМЕРКОСКИ Юкка (FI),
КИЛПИНЕН Антти (FI)

(73) Патентообладатель(и):

ММС Коппер Продактс Ой (FI)

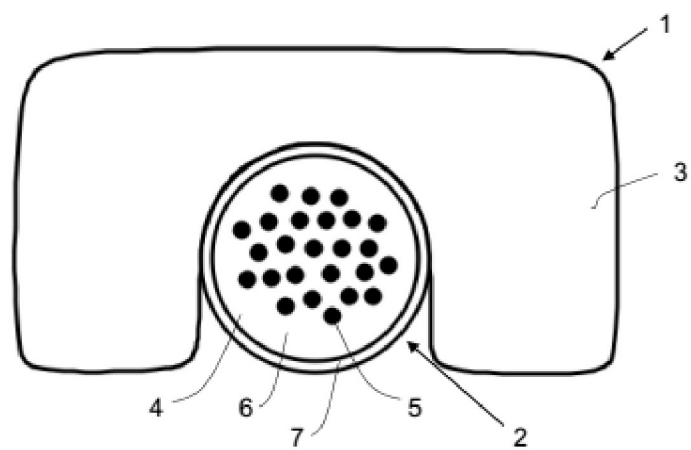
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: WO 2006035065 A2, 06.04.2006. US
4333228 A, 08.06.1982. CN 102708988 A,
03.10.2012. US 3743986 A, 03.07.1973. US
5917393 A, 29.06.1999. WO 2008007141 A1,
17.01.2008. JP H0471112 A, 05.03.1992. RU
2313150 C2, 20.12.2007.

(54) МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ СБОРКА, СОДЕРЖАЩАЯ СВЕРХПРОВОДНИК

(57) Реферат:

Изобретение относится к электротехнике. Технический результат состоит в уменьшении габаритов за счет улучшения охлаждения. Металлическая сборка (1) предназначена для наматывания в катушку для использования в магнитах с постоянным током. Металлическая сборка содержит изолированный сверхпроводящий провод (2), содержащий сверхпроводящий проводник (4) из материала со сверхпроводящими свойствами в заданном температурном режиме, заделанный в металлическую матрицу (6), и

электроизоляционный слой (7), выполненный как покрытие на сверхпроводящем проводе. Металлическая сборка далее содержит теплопроводный элемент (3) из теплопроводного материала, выполненный в виде слоя, по меньшей мере частично окружающего изолированный сверхпроводящий провод, так что металлическая сборка, будучи смотанной в катушку, имеет изотропные или главным образом изотропные теплопроводные свойства. 4 н. и 12 з.п. ф-лы, 7 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY
(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(19) **RU** (11)**2 684 901**⁽¹³⁾ **C2**

(51) Int. Cl.
H01F 6/02 (2006.01)

(52) CPC
H01F 6/02 (2019.02)

(21) (22) Application: **2017106802, 28.08.2015**

(24) Effective date for property rights:
28.08.2015

Registration date:
16.04.2019

Priority:

(30) Convention priority:
01.09.2014 FI 20145755

(43) Application published: **03.10.2018 Bull. № 28**(45) Date of publication: **16.04.2019 Bull. № 11**(85) Commencement of national phase: **03.04.2017**

(86) PCT application:
EP 2015/069716 (28.08.2015)

(87) PCT publication:
WO 2016/034503 (10.03.2016)

Mail address:
**107061, g. Moskva, ul. Preobrazhenskaya pl., d. 6,
OOO "Vakhnina i Partnery"**

(72) Inventor(s):

**SOMERKOSKI, Jukka (FI),
KILPINEN, Antti (FI)**

(73) Proprietor(s):

MMS Kopper Produkts Oj (FI)

(54) **METALLIC ASSEMBLY CONTAINING SUPERCONDUCTOR**

(57) Abstract:

FIELD: electrical engineering.

SUBSTANCE: metal assembly (1) is intended for winding in coil for use in direct current magnets. Metal assembly comprises insulated superconducting wire (2) comprising superconducting conductor (4) from material with superconducting properties in preset temperature mode, embedded in metal matrix (6), and electrically insulating layer (7) made as coating on superconducting wire. Metal assembly further comprises heat-conducting

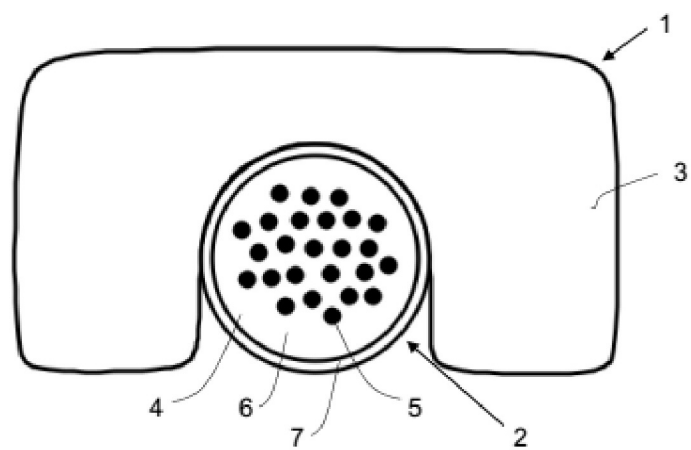
element (3) of heat-conducting material, made in form of layer, at least partially surrounding insulated superconducting wire, so that metal assembly, being coiled, has isotropic or mainly isotropic heat-conducting properties.

EFFECT: technical result consists in reduction of dimensions due to improved cooling.

16 cl, 7 dwg

R U 2 6 8 4 9 0 1 C 2

R U 2 6 8 4 9 0 1 C 2



Фиг. 1

Область техники, к которой относится изобретение

Данное изобретение относится к металлической сборке, содержащей изолированный сверхпроводящий провод в соответствии с вводной частью п. 1 формулы изобретения. Оно также относится к обмотке электромагнита, содержащей такую металлическую сборку, и к электромагниту, охлаждаемому за счет теплопроводности. Металлические сборки в соответствии с изобретением также могут использоваться в магнитах с криогенным охлаждением. Металлическая сборка данного изобретения преимущественно, но не исключительно, предназначена для использования в практических применениях электромагнитов постоянного тока, таких как ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и магнитно-резонансная томография (МРТ).

ПРЕДШЕСТВУЮЩИЙ УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

Низкотемпературные сверхпроводники, такие как NbTi и Nb₃Sn или производные от них обычно используются при 4,2 К (температура жидкого гелия) для создания сильных магнитных полей в практических применениях сверхпроводников, таких как исследовательские магниты, ядерный магнитный резонанс (ЯМР) и магнитно-резонансная томография (МРТ). Разные технологии намотки катушки, такие как мокрая намотка, сухая намотка или эпоксидное пропитывание, могут использоваться для проектирования сверхпроводящих магнитов для использования в таких практических применениях. Во всех этих случаях катушка содержит сверхпроводящий провод, чья наружная периферия покрыта электроизоляционным слоем, таким как поливинилацетальная смола (Формвар), полиэтиленимид (ПЭИ), полиэтилентерефталат (ПЭТФ), стекловолокно, сложный полиэфир, полиимид (ПИ) и т.д., создавая также теплоизоляцию между витками провода и слоями магнита. Успешное использование таких изолированных конструкций зависит во многом от способности жидкого гелия эффективно охлаждать обмотки катушки.

Из-за нехватки жидкого гелия идет постоянная борьба за снижение потребности в жидком гелии в практических применениях сверхпроводников. Например, сейчас есть магниты, которые можно использовать сухими без жидкого гелия, т.е. так называемые магниты с криогенным охлаждением или магниты, охлаждаемые за счет теплопроводности, в которых обмотки катушки находятся в вакууме, и охлаждение осуществляется посредством крионасосов через теплопроводные элементы, соединенные с обмотками магнита. Например, охлаждение внутренних частей обмотки может быть улучшено путем расположения отдельных теплопроводных каналов с дополнительными теплопроводными элементами, например, медными или алюминиевыми. Однако трудно добиться достаточно эффективного охлаждения магнита таким способом. Другая проблема состоит в том, что магниты, созданные с использованием такого способа, отличаются общей пониженной плотностью тока и, таким образом, более слабым магнитным полем, или, в альтернативном варианте, требуют большего объема и более дорогой сверхпроводящий провод для создания такого же магнитного поля.

СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Задача данного изобретения - представить металлическую сборку, содержащую изолированный сверхпроводящий провод, который по меньшей мере в каком-либо аспекте усовершенствован относительно металлическихборок предшествующего уровня техники, содержащих изолированные сверхпроводящие провода. В частности, задачей является представить металлическую сборку для использования в сверхпроводящем магните, охлаждаемом за счет теплопроводности, который обеспечивает более эффективное охлаждение магнита. Другая задача - представить металлическую сборку для использования в сверхпроводящем магните, охлаждаемом

за счет теплопроводности, с помощью которой размер магнита может быть уменьшен по сравнению с известными магнитами, охлаждаемыми за счет теплопроводности, такими как описывалось выше.

Эти задачи осуществляются с помощью металлической сборки, содержащей по меньшей мере один изолированный сверхпроводящий провод, проходящий в продольном направлении, отличающийся тем, что каждый по меньшей мере из одного сверхпроводящего провода содержит:

- сверхпроводящий провод, содержащий материал, который демонстрирует сверхпроводящие свойства в заданном температурном диапазоне, заделанный в металлическую матрицу, и
- электроизоляционный слой, расположенный как покрытие сверхпроводящего провода.

Металлическая сборка характеризуется тем, что она далее содержит теплопроводный элемент, содержащий теплопроводный материал, расположенный как слой, по меньшей мере частично окружающий по меньшей мере один изолированный сверхпроводящий провод, так что металлическая сборка, будучи смотанной в катушку, демонстрирует изотропные или преимущественно изотропные теплопроводные свойства.

Используя металлическую сборку в соответствии с изобретением, возможно получить сверхпроводящий магнит, охлаждаемый за счет теплопроводности, с улучшенной теплопроводностью в обмотках катушки магнита. Теплопроводный элемент, который расположен в тесном контакте по меньшей мере с частью электроизоляционного слоя по меньшей мере одного изолированного сверхпроводящего провода, допускает проведение тепла во всех направлениях в обмотках катушки, когда металлическая сборка смотана в катушку. Для катушки с несколькими слоями внутренние слои катушки охлаждаются с помощью теплопроводного элемента, создавая теплопроводные каналы до наружных слоев катушки, где расположены охлаждающие элементы. Разумеется, также возможно вместо этого или дополнительно размещать охлаждающие элементы во внутренних или в средних слоях катушки, в зависимости от того, что более удобно или экономически эффективно с точки зрения устройства магнита. Посредством теплопроводного элемента, обеспечивающего трехмерное изотропное проведение тепла в обмотках катушки, тепло может эффективно отводиться при минимальном использовании гелия. В металлической сборке в соответствии с изобретением теплопроводный элемент включен по меньшей мере в один изолированный сверхпроводящий провод, и магнит, содержащий эту сборку, смотанную в катушку, поэтому может быть сделан намного более компактным, чем магнит, в котором теплопроводные элементы в форме металлических пластин должны вставляться между последовательно лежащими слоями обмоток катушки. Металлическая сборка особенно подходит для использования в практических применениях электромагнитов постоянного тока.

В соответствии с одним вариантом осуществления изобретения, теплопроводный элемент имеет среднюю толщину слоя по меньшей мере в 0,2 раза от эквивалентного диаметра по меньшей мере одного изолированного сверхпроводящего провода, предпочтительно по меньшей мере в 0,5 раз. С такой толщиной слоя теплопроводные свойства металлической сборки становятся изотропными, когда металлическая сборка сматывается в катушку с несколькими витками и слоями. Использование слишком малой толщины слоя может привести к недостаточной теплопроводности в поперечном направлении катушки, и, таким образом, охлаждение обмоток катушки будет менее эффективным. Эквивалентный диаметр изолированного сверхпроводящего провода

здесь необходимо понимать как диаметр круглого провода с площадью сечения, равной фактической площади сечения изолированного сверхпроводящего провода. В случае с круглым проводом эквивалентный диаметр является диаметром провода.

В соответствии с одним вариантом осуществления изобретения теплопроводный элемент и металлическая матрица по меньшей мере в одном изолированном сверхпроводящем проводе вместе имеют объем, по меньшей мере в два раза превышающий объем материала, который демонстрирует сверхпроводящие свойства в заданном температурном диапазоне, предпочтительно по меньшей мере в пять раз. При таком соотношении объемов магнит защищен, если он быстро охлаждается, то есть входит в нормальное, резистивное состояние. Кроме того, это соотношение объемов позволяет получить достаточную толщину слоя теплопроводного элемента, так чтобы можно было обеспечить изотропные теплопроводные свойства.

В соответствии с одним вариантом осуществления изобретения теплопроводный материал выбирается из меди, медного сплава, алюминия, алюминиевого сплава или композиционного материала, содержащего медь и алюминий. Эти материалы обеспечивают необходимую стабилизацию и имеют хорошие теплопроводные свойства при низких температурах. Если малый вес является предпочтительным, алюминиевый сплав или композиционный материал, содержащий медь и алюминий, может использоваться.

В соответствии с предпочтительным вариантом осуществления изобретения теплопроводный материал выбирается из высокочистой меди, высокочистого алюминия или композиционного материала из плакированного медью алюминия. Высокочистая медь и алюминий обладают превосходными теплопроводными свойствами при низких температурах, а композиционный материал из плакированного медью алюминия может использоваться в случае, когда малый вес в сочетании с повышенной механической прочностью является желаемым.

В соответствии с предпочтительным вариантом осуществления изобретения электроизоляционный слой содержит изолятор, имеющий резистивность по меньшей мере в 10^7 Ом, предпочтительно по меньшей мере 10^{10} Ом. Это обеспечивает превосходную изоляцию и диэлектрическую прочность существенно выше 1 кВ. Таким образом, слой способен выдерживать большую разность напряжений, например, когда сверхпроводящий магнит быстро охлаждается, без разрушительных коротких замыканий.

В соответствии с одним вариантом осуществления изобретения электроизоляционный слой содержит изолятор на основе полимера, предпочтительно выбранный из группы поливинилацетальных смол (Формвар), полиэтиленимила (ПЭИ), полиэтилентерефталата (ПЭТФ), стекловолокна, сложного полиэфира и полиимида (ПИ). Помимо обеспечения превосходной электроизоляции, изоляторы на основе полимера имеют дополнительное преимущество, обеспечивая гибкость. Металлическую сборку можно в связи с этим легче осуществлять, так как риск повредить электроизоляционный слой снижается.

В соответствии с одним вариантом осуществления изобретения металлическая сборка далее содержит слой с высокой электрорезистивностью, расположенный как покрытие на теплопроводном элементе. Такой слой должен быть относительно тонким по сравнению с теплопроводным элементом и подходящим для предотвращения вихревых токов в теплопроводном элементе, которые в ином случае могут вызывать нежелательное нагревание. В том случае, когда металлическая сборка прежде всего предназначена для использования в высоком вакууме, предпочтительно, чтобы слой

с высокой электрорезистивностью имел низкое парциальное давление испарения. Слой с высокой электрорезистивностью здесь следует понимать как слой, который при низких температурах имеет относительно высокую резистивность по сравнению с металлической матрицей, вставленной в сверхпроводящие нити, например, по меньшей мере в 10 раз, предпочтительно в 100 раз, более высокую резистивность, чем металлическая матрица.

В соответствии с одним вариантом осуществления изобретения упомянутый слой с высокой электрорезистивностью является металлическим слоем, содержащим хром, никель, олово, индий или их сплавы. Все эти элементы имеют низкое парциальное давление испарения и высокую резистивность и могут применяться в форме тонких покрытий.

В соответствии с другим вариантом осуществления изобретения упомянутый слой с высокой электрорезистивностью является керамическим или оксидным слоем, содержащим, например, оксид алюминия, оксид хрома, оксид титана, оксид циркония или оксида алюминия и титана.

В соответствии с другим вариантом осуществления изобретения упомянутый слой с высокой электрорезистивностью является электроизоляционной органической полимерной пленкой. Пленка может содержать поливинилацетальную смолу, ПЭИ, ПИ, или ПЭТФ или что-либо подобное. Хотя такая пленка также имеет теплоизоляционные свойства, если слой изготовлен достаточно тонким, например, менее 100 $\mu\text{м}$ толщиной, предпочтительно менее чем 10 $\mu\text{м}$ толщиной, общая теплопроводность в катушке, содержащей металлическую сборку, все же является достаточной.

В соответствии с одним вариантом осуществления изобретения металлическая сборка расположена как конструкция «провод в канале», в которой по меньшей мере один изолированный сверхпроводящий провод расположен в продольной канавке в теплопроводном элементе. Канал, таким образом, формируется в теплопроводном элементе. Даже при том, что теплопроводный элемент не полностью покрывает изолированный сверхпроводящий провод, когда он смотан в катушку с несколькими слоями, каждый последующий виток изолированного сверхпроводящего провода будет окружен теплопроводным материалом. Поэтому теплопроводные свойства катушки являются по-прежнему изотропными. Предпочтительно, чтобы металлическая сборка в этом варианте осуществления имела прямоугольное или главным образом прямоугольное поперечное сечение, чтобы обеспечить высокий фактор заполнения, когда катушка намотана.

В соответствии с другим вариантом осуществления изобретения теплопроводный элемент расположен как слой, полностью окружающий по меньшей мере один изолированный сверхпроводящий провод. Такой теплопроводный элемент образует обмотки катушки, содержащие металлическую сборку с охлаждающими каналами во всех направлениях также в случае, когда желательно круглое сечение, или когда обмотки катушки менее туго намотаны.

В соответствии с одним вариантом осуществления изобретения металлическая сборка далее содержит металлическую сетку, расположенную ближе всего к наружной поверхности в металлической сборке. Такая металлическая сетка, расположенная снаружи теплопроводного элемента, полезна, если обмотка катушки, содержащая металлическую сборку, крепится посредством эпоксидной пропитки. Металлическая сетка, с одной стороны, позволяет эпоксиду проникать в металлическую сборку, эффективно фиксируя металлическую сборку, и, с другой стороны, образует теплопроводные мостики между последовательными витками и слоями катушки во

время работы магнита, содержащего катушку.

Изобретение также относится к катушке для электромагнита, содержащей металлическую сборку в соответствии с изобретением, такую, как описана выше, к электромагниту, охлаждаемому за счет теплопроводности, содержащему такую катушку, и к электромагниту с криогенным охлаждением, содержащему такую катушку. Магнит, охлаждаемый за счет теплопроводности, может быть либо с криогенным охлаждением, либо быть без криогена. Предпочтительные варианты осуществления и преимущества такой катушки и электромагнита соответствуют тем, что описаны выше.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

Подробное описание изобретения со ссылками на прилагаемые чертежи следует ниже. На чертежах:

На фиг. 1 схематически изображено сечение металлической сборки в соответствии с первым вариантом осуществления изобретения.

На фиг. 2 схематически изображено сечение металлической сборки в соответствии со вторым вариантом осуществления изобретения.

На фиг. 3 схематически изображено сечение металлической сборки в соответствии с третьим вариантом осуществления изобретения.

На фиг. 4 схематически изображено сечение металлической сборки в соответствии с четвертым вариантом осуществления изобретения.

На фиг. 5 схематически изображено сечение металлической сборки в соответствии с пятым вариантом осуществления изобретения.

На фиг. 6 схематически изображено сечение металлической сборки в соответствии с шестым вариантом осуществления изобретения.

На фиг. 7 схематически изображено сечение металлической сборки в соответствии с седьмым вариантом осуществления изобретения.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ВАРИАНТОВ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Поперечные сечения семи разных вариантов осуществления металлической сборки в соответствии с изобретением схематически изображены на фиг. 1-7. Одинаковые ссылочные номера используются для обозначения одинаковых или аналогичных компонентов для всех изображенных вариантов осуществления.

Первый вариант осуществления металлической сборки 1 в соответствии с изобретением изображен на фиг. 1. Металлическая сборка 1 в соответствии с этим вариантом осуществления является так называемой конструкцией «провод в канале», содержащей изолированный сверхпроводящий провод 2, проходящий в продольном направлении, который вставлен в канавку, сформированную в теплопроводном элементе 3. Изолированный сверхпроводящий провод 2 содержит сверхпроводящий провод 4, который состоит из нитей 5 из материала, который демонстрирует сверхпроводящие свойства в заданном температурном диапазоне, заделанный в металлическую матрицу 6. Изолированный сверхпроводящий провод 2 далее содержит электроизоляционный слой 7, расположенный как покрытие на сверхпроводящем проводе 4. Изолированный сверхпроводящий провод 2 имеет круглое сечение в изображенном варианте осуществления. Однако он также может быть прямоугольным или квадратным по форме, когда, например, предпочтительно высокое аспектное отношение геометрии проводника.

Чтобы добиться тесного контакта между изолированным сверхпроводящим проводом 2 и теплопроводным элементом 3, изолированный сверхпроводящий провод может быть механически зафиксирован в канавке с помощью подходящего способа металлообработки, например, путем протягивания через пресс-форму, имеющую

прямоугольное отверстие, или прокатки с помощью так называемых четырехроликовых туркоголовых валков. Тесный контакт может также быть получен, например, путем нанесения эпоксида на поверхность изолированного сверхпроводящего провода с помощью способа пропитки *in situ*. В некоторых случаях теплопроводные эпоксидные смолы или композиционные материалы из них либо с относительно низкой, либо с относительно высокой электропроводностью могут быть выбраны в зависимости от конкретного применения.

Второй вариант осуществления металлической сборки 1 в соответствии с изобретением изображен на фиг. 2. Металлическая сборка 1 в соответствии с этим вариантом осуществления отличается от первого варианта осуществления тем, что теплопроводный элемент 3 полностью покрывает изолированный сверхпроводящий провод 2. Теплопроводный элемент 3 имеет форму слоя с однородной толщиной, и металлическая сборка поэтому имеет круглое сечение. Изолированный сверхпроводящий провод 2 состоит из тех же элементов, что и в первом варианте осуществления, и имеет круглое сечение.

Третий вариант осуществления металлической сборки 1 в соответствии с изобретением изображен на фиг. 3. Как и во втором варианте осуществления, теплопроводный элемент 3 полностью покрывает изолированный сверхпроводящий провод 2. Металлическая сборка 1 отличается от металлической сборки 1 в соответствии со вторым вариантом осуществления тем, что изолированный сверхпроводящий провод 2 и металлическая сборка 1 имеют существенно прямоугольные сечения с закругленными углами.

Четвертый вариант осуществления металлической сборки 1 в соответствии с изобретением изображен на фиг. 4. В этом варианте осуществления изолированный сверхпроводящий провод 2 имеет круглое сечение, при этом металлическая сборка 1 имеет главным образом прямоугольное сечение с закругленными углами. При сматывании в катушку прямоугольное наружное сечение повышает фактор заполнения по сравнению с круглым сечением.

Металлическая сборка 1 в соответствии со вторым, третьим и четвертым вариантами осуществления может производиться путем плакирования изолированного сверхпроводящего провода 2 материалом, который составляет теплопроводный элемент 3, например, металлической полосой. Это можно сделать с использованием хорошо известных технологий плакирования, таких как обмотка или приваривание, или с использованием технологии низкотемпературной экструзии, предпочтительно технологии непрерывной экструзии, например, так называемого конформ-процесса экструзии. Предпочтительно, экструзия осуществляется при температуре менее 300°C, после чего следует быстрое охлаждение.

Пятый вариант осуществления металлической сборки 1 в соответствии с изобретением изображен на фиг. 5. В этом варианте осуществления изолированный сверхпроводящий провод 2 покрыт композитным теплопроводным элементом 3, содержащим алюминиевый слой 8 и медный слой 9, который полностью покрывает алюминиевый слой. Металлическая сборка в соответствии с этим вариантом осуществления может производиться путем плакирования изолированного сверхпроводящего провода 2 алюминием с использованием технологии низкотемпературной экструзии при температуре менее 300°C, предпочтительно технологии непрерывной экструзии, например, так называемого конформ-процесса экструзии. После этого изолированный сверхпроводящий провод 2 с алюминиевым слоем 8 плакируется, например, высокочистой медью с помощью хорошо известных технологий, применяемых в кабельной промышленности.

Шестой вариант осуществления металлической сборки 1 изображен на фиг. 6. В этом варианте осуществления несколько изолированных сверхпроводящих проводов 2 вставлены в канавку, сформированную в теплопроводном элементе 3, формируя конструкцию «провод в канале». Изолированные сверхпроводящие провода 2 могут

быть перекрещены или скручены в форму кабеля перед вставкой в канавку. Металлическая сборка 1 в соответствии с седьмым вариантом осуществления изобретения изображена на фиг. 7. В этом варианте осуществления несколько изолированных сверхпроводящих проводов 2, каждый включает в себя теплопроводный элемент 3', связаны в пучок или скручены вместе и вставлены в канавку, сформированную в более крупном теплопроводном элементе 3". Общее количество теплопроводного материала в теплопроводных элементах 3', 3" должно быть таким, чтобы добиться изотропной теплопроводности, когда металлическая сборка 1 смотана в катушку.

Также в вариантах осуществления, изображенных на фиг. 2-5, одиночный изолированный сверхпроводящий провод 2 может быть заменен на пучок изолированных сверхпроводящих проводов, таких как кабель.

Во всех изображенных вариантах осуществления теплопроводный элемент может далее быть покрыт материалом, который образует тонкий высоко электрорезистивный слой (не изображен), покрывающий металлическую сборку. Этот слой обычно 1-50 μm толщиной, предпочтительно 1-10 μm , и может быть, например, металлическим, керамическим или оксидным слоем, содержащим хром, никель, олово, индий и их сплавы, которые имеют и низкое парциальное давление испарения, и высокую электрорезистивность. Олово, индий и их сплавы могут быть покрыты с использованием, например, покрытия расплавленным металлом или электропокрытия, тогда как другие металлы могут быть покрыты с использованием, например, электропокрытия, химическим осаждением из паровой фазы или физическим осаждением из паровой фазы. Покрытие может наноситься на теплопроводный элемент до или после сборки теплопроводного элемента и изолированного сверхпроводящего провода.

Слой с высокой электрорезистивностью может также изготавливаться из органического полимерного материала, такого как поливинилацетальная смола, ПЭИ, ПИ, ПЭТФ или чего-либо подобного. В этом случае слой предпочтительно наносится на поверхность теплопроводного элемента после сборки теплопроводного элемента и изолированного сверхпроводящего провода с использованием, например, электронно-лучевого отверждения или ультрафиолетового отверждения при температурах, близких к температуре окружающей среды, предпочтительно ниже 300°C. Хотя упомянутые органические полимерные материалы также имеют теплоизоляционные свойства, тонкий слой в 1-50 μm , предпочтительно 1-10 μm , тем не менее, образует каналы с хорошей теплопроводностью в обмотках катушки, изготовленных из металлической сборки.

Во всех изображенных вариантах осуществления сверхпроводящий провод 4 может состоять из любого сверхпроводящего материала, который может изготавливаться протяженным в круглой, прямоугольной или лентообразной форме. Сверхпроводящий провод 4 может, например, быть так называемым низкотемпературным проводом, содержащим одну или множество нитей 5 из материала, такого как NbTi или Nb₃Sn, или их сплавов.

Металлическая матрица 6, в которую заделаны нити 5, может быть матрицей из высокочистой меди или алюминия или матрицей из алюминиевого сплава. Для практических применений магнита переменного тока подходят нити 5 из NbTi, заделанные в матрицу 6 из медного сплава, легированного магнием или никелем. Для

практических применений магнита постоянного тока подходят нити 5 из NbTi, заделанные в матрицу из высокочистой меди.

Если используются нити из Nb₃Sn, эти ниобиевые нити предпочтительно заделаны в однородную медную матрицу, содержащую олово (так называемый способ с бронзой), или в медную матрицу с источником олова или оловянного сплава (так называемый способ с внутренним оловом), обычно окруженную ниобиевым и/или танталовым диффузионным барьером и стабилизирующей медью. Перед интеграцией с теплопроводным элементом провод, или в альтернативном варианте композитный кабель, изолируется, например, путем высокотемпературной стеклянной изоляции. Высокотемпературная реакция, которая образует сверхпроводящую фазу Nb₃Sn, может происходить перед или после операции намотки катушки. Из-за высокой температуры реакции теплопроводный элемент изолируется с помощью подходящего хромового, керамического или оксидного покрытия.

Сверхпроводящий провод 4, нормализованный до содержания 50% сверхпроводящего материала, обычно составляет 0,5-1,5 мм в эквивалентном диаметре, чтобы он мог переносить достаточно большой ток для создания сильного магнитного поля в большом объеме.

Электроизоляционный слой 7 во всех изображенных вариантах осуществления может быть изготовлен из изоляционных материалов, обычно используемых в области техники для NbTi. Такие материалы включают в себя керамические изоляторы, а также изоляторы на основе полимера, например, выбранные из группы поливинилацетальных смол (Формвар), полиэтиленимила (ПЭИ), полиэтилентерефталата (ПЭТФ), стекловолна, сложного полиэфира и полиимида (ПИ). Толщина электроизоляционного слоя 7 обычно варьируется между 30-100 мкм, обеспечивая достаточную электрическую изоляцию между витками и слоями, и расположен так, что полностью покрывает периферию сверхпроводящего провода 4.

Теплопроводный элемент 3 во всех изображенных вариантах осуществления предпочтительно изготовлен из меди высокочистой криогенной марки или высокочистого алюминия. Он также может быть изготовлен из канала или структуры из плакированной алюминиевым композитом меди, такой, как изображена на фиг. 5, медных сплавов или алюминиевых сплавов в зависимости от требований к конечному продукту. Теплопроводный элемент 3 предпочтительно имеет форму слоя, проходящего вдоль изолированного сверхпроводящего провода 2 и в тесном контакте с таковым, или с однородной толщиной по периферии изолированного сверхпроводящего провода 2, или с толщиной, которая варьируется по периферии. Слой может полностью или частично покрывать изолированный сверхпроводящий провод 2. В случае, когда слой только частично покрывает изолированный сверхпроводящий провод 2, он должен предпочтительно покрывать основной участок поверхности провода, так что, когда металлическая сборка 1 смотана в катушку, изолированный сверхпроводящий провод 2 окружен материалом теплопроводного элемента 3.

Теплопроводный элемент 3 должен обычно иметь среднюю толщину слоя в 0,10 мм или более, предпочтительно по меньшей мере 0,50 мм, в зависимости от размера сверхпроводящего провода 4. Теплопроводный элемент 3 предпочтительно имеет среднюю толщину слоя по меньшей мере в 0,2 раза от эквивалентного диаметра изолированного сверхпроводящего провода 2, предпочтительно по меньшей мере в 0,5 раз. Теплопроводный элемент 3 и металлическая матрица 6 в изолированном сверхпроводящем проводе 2 должны совместно предпочтительно иметь объем по меньшей мере в два раза больше объема сверхпроводящих нитей 5, более

предпочтительно по меньшей мере в пять раз.

Металлическая сборка 1 в соответствии с любым изображенным вариантом осуществления для использования в магните с криогенным охлаждением, например, в магните, охлаждаемом жидким гелием, или в альтернативном варианте в магните без криогена, охлаждаемом за счет теплопроводности, смотана в катушку в форме соленоида, содержащего по меньшей мере один слой металлической сборки 1, предпочтительно несколько слоев. В магните, охлаждаемом за счет теплопроводности, теплопроводный элемент 3, помимо обеспечения теплопроводности, также обеспечивает электрическую стабилизацию. Это особенно важно, если при эксплуатации сверхпроводящий провод 4 подвергается переходу в нормальное состояние по какой-либо причине, например, из-за магнитных помех, скачка потока, механического движения провода и т.п. В этом случае ток автоматически проводится через теплопроводный элемент 3, и сверхпроводящему проводу 4 дают возможность охладиться, так что сверхпроводящее состояние может быть восстановлено.

В катушке, используемой в электромагнитной обмотке, содержащей металлическую сборку 1, металлическая сборка может быть закреплена, чтобы избежать относительного движения металлической сборки в катушке. Металлическая сборка может, например, быть закреплена с помощью эпоксидной пропитки. В этом случае предпочтительно снабдить металлическую сборку металлической сеткой, нанесенной на теплопроводный элемент, или покрытием, наложенным снаружи на теплопроводный элемент. Металлическая сетка может, например, быть наложена на поверхность металлической сборки и иметь форму тонких проводов из высокочистой меди или алюминия, переплетенных вокруг металлической сборки.

Изолированный сверхпроводящий провод может также быть основан на сплавах MgB_2 или любом другом сверхпроводящем материале, пригодном для изготовления в вытянутой форме и для создания сильных магнитных полей с использованием конструкций проводов имеющегося уровня техники.

Изобретение, разумеется, никоим образом не ограничивается вариантами осуществления, описанными выше, но возможности модификаций будут очевидны для специалиста в данной области техники без отклонения от объема и сущности настоящего изобретения, определенного в прилагаемой формуле изобретения.

(57) Формула изобретения

1. Металлическая сборка (1), содержащая по меньшей мере один изолированный сверхпроводящий провод (2), проходящий в продольном направлении, причем по меньшей мере один сверхпроводящий провод (2) содержит:

- сверхпроводящий провод (4), содержащий материал (5), который демонстрирует сверхпроводящие свойства в заданном температурном диапазоне, заделанный в металлическую матрицу (6), и

- электроизоляционный слой (7), расположенный как покрытие на сверхпроводящем проводе (4), причем электроизоляционный слой (7) содержит изолятор на основе полимера, имеющий резистивность по меньшей мере $10^7 \Omega m$, отличающаяся тем,

что металлическая сборка (1) дополнительно содержит теплопроводный элемент (3), содержащий теплопроводный материал, расположенный как слой, по меньшей мере частично окружающий по меньшей мере один изолированный сверхпроводящий провод (2), так что металлическая сборка (1), когда смотана в катушку, демонстрирует изотропные или преимущественно изотропные теплопроводные свойства, причем

теплопроводный материал выбирается из меди, медного сплава, алюминия, алюминиевого сплава или композиционного материала, содержащего медь и алюминий.

2. Металлическая сборка по п 1, отличающаяся тем, что теплопроводный элемент (3) имеет среднюю толщину слоя по меньшей мере 0,2 раза от эквивалентного диаметра по меньшей мере одного изолированного сверхпроводящего провода (2), предпочтительно по меньшей мере 0,5 раза.

3. Металлическая сборка по п. 1 или 2, отличающаяся тем, что теплопроводный элемент (3) и металлическая матрица (6) по меньшей мере в одном изолированном сверхпроводящем проводе (2) вместе имеют объём, по меньшей мере в два раза больший, чем объём материала (5), который демонстрирует сверхпроводящие свойства в заданном температурном диапазоне, предпочтительно по меньшей мере в пять раз.

4. Металлическая сборка по любому из предыдущих пунктов, отличающаяся тем, что теплопроводный материал выбирается из высокочистой меди, высокочистого алюминия или композиционного материала из плакированного медью алюминия.

5. Металлическая сборка по любому из предыдущих пунктов, отличающаяся тем, что электроизоляционный слой (7) содержит изолятор, имеющий резистивность по меньшей мере в 10^{10} Ом.

6. Металлическая сборка по любому из предыдущих пунктов, отличающаяся тем, что изолятор на основе полимера выбирается из группы поливинилацетальных смол (Formvar), полиэтиленimina (PEI), полиэтилентерефталата (ПЭТФ), стекловолокна, сложного полиэфира и полиимида (PI).

7. Металлическая сборка по любому из предыдущих пунктов, отличающаяся тем, что металлическая сборка дополнительно содержит слой с высокой электрорезистивностью, расположенный как покрытие на теплопроводном элементе (3).

8. Металлическая сборка по п. 7, отличающаяся тем, что упомянутый слой с высокой электрорезистивностью является металлическим слоем, содержащим хром, никель, олово или их сплавы.

9. Металлическая сборка по п. 7, отличающаяся тем, что упомянутый слой с высокой электрорезистивностью является керамическим или оксидным слоем, содержащим, например, оксид алюминия, оксид хрома, оксид титана, оксид циркония или оксид алюминия и титана.

10. Металлическая сборка по п. 7, отличающаяся тем, что упомянутый слой с высокой электрорезистивностью является электроизоляционной органической полимерной плёнкой.

11. Металлическая сборка по любому из предыдущих пунктов, отличающаяся тем, что металлическая сборка (1) расположена как конструкция «провод в канале», в которой по меньшей мере один изолированный сверхпроводящий провод (2) расположен в продольной канавке в теплопроводном элементе (3).

12. Металлическая сборка по любому из пп. 1-10, отличающаяся тем, что теплопроводный элемент (3) расположен как слой, полностью окружающий по меньшей мере один изолированный сверхпроводящий провод (2).

13. Металлическая сборка по любому из предыдущих пунктов, отличающаяся тем, что металлическая сборка дополнительно содержит металлическую сетку, расположенную ближе всего к наружной поверхности в металлической сборке.

14. Катушка для электромагнита, содержащая металлическую сборку (1) по любому из предыдущих пунктов.

15. Электромагнит, охлаждаемый за счёт теплопроводности, содержащий катушку

по п. 14.

16. Электромагнит с криогенным охлаждением, содержащий катушку по п. 14.

5

10

15

20

25

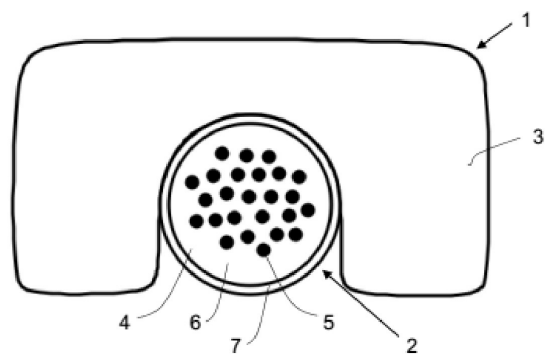
30

35

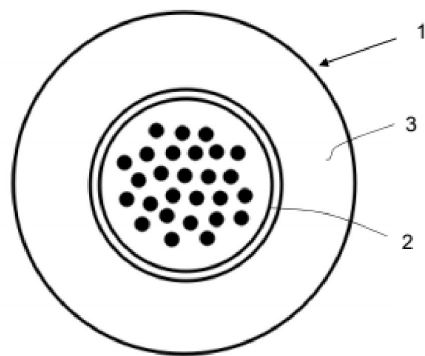
40

45

1

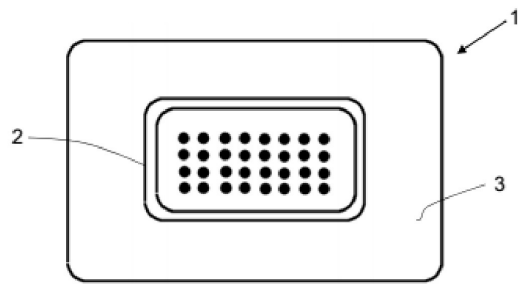


Фиг. 1

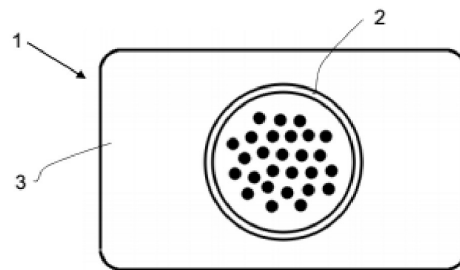


Фиг. 2

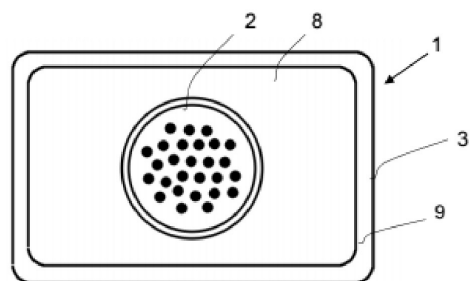
2



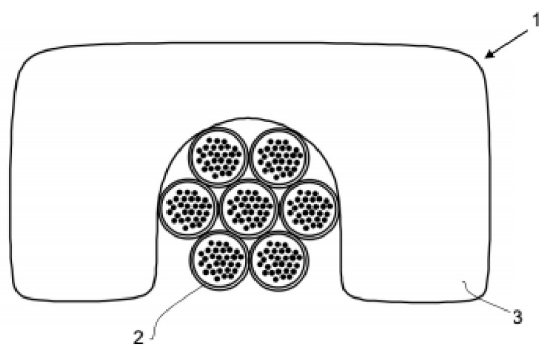
Фиг. 3



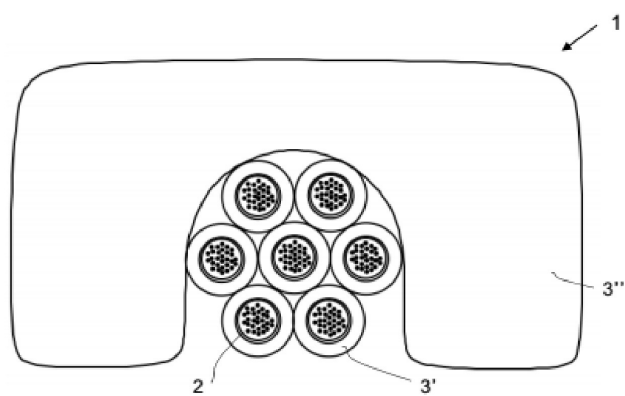
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7