УДК 538.90

СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ МНОГОСЛОЙНАЯ ЛЕНТА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ МР-ТОМОГРАФОВ, ИЗГОТОВЛЕННАЯ ПО ТВЕРДОФАЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

© 2021 г. В. П. Коржов^{1, *}, В. Н. Зверев¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт физики твердого тела Российской академии наук", Черноголовка, Россия *E-mail: korzhov@issp.ac.ru Поступила в редакцию 25.01.2021 г. После доработки 25.02.2021 г.

Принята к публикации 29.03.2021 г.

Описана твердофазная технология получения сверхпроводящей многослойной ленты со слоями толщиной ~150 нм из твердого раствора Ti в Nb и сплава Nb-50% Ti. Толщина ленты -0.1 мм. Измерения критического тока полученных лент при перпендикулярной и параллельной ориентациях внешнего магнитного поля H относительно плоскости слоев показали большую анизотропию в магнитных полях H > 1 Tл. Это свидетельствует о закреплении сверхпроводящих вихрей на несверхпроводящих слоях Nb-твердого раствора. Критический ток в поле 5 Tл достигал 50 A на 1 мм ширины ленты.

DOI: 10.31857/S0367676521070127

ВВЕДЕНИЕ

Первый магниторезонансный томограф (МРТ) со сверхпроводящим магнитом открытого типа с полем 0.35 Тл был представлен в 1997 г. фирмой "Toshiba". МР-томография — это высокоинформативный и безвредный для здоровья человека метод диагностики на принципе магнитного резонанса ядер водорода — элемента, очень распространенного в теле человека. В наше время МРтомографы с использованием сверхпроводимости получают все большее распространение. Две его модели были построены и в России в 2017 г. [1]: полноразмерный томограф с индукцией поля 1.5 Тл и "теплым отверстием" диаметром 90 и длиной 170 см и компактный ортопедический томограф.

Для изготовления сверхпроводящей магнитной системы MP-томографов в России использовали отечественный кабель диаметром 0.8 мм с 19-ю жилами из сплава Nb—50 мас. %Ti в Cu-матрице. Это — деформируемый сплав с температурой перехода в сверхпроводящее состояние 9.6 К, ставший в СССР и за рубежом первым сверхпроводником промышленного производства для практического использования.

Исследования сверхпроводящих сплавов Nb— Ті, приходившиеся на период 1960—1970-х годов, воплотились в промышленную технологию получения многожильных сверхпроводников на основе сплава HT-50 (Nb-50% Ti). В настоящее время исследовательские работы по ним не ведутся.

Занимаясь многослойными материалами, получаемых прокаткой искусственно формируемых многослойных пакетов, на предмет зависимости их механических свойств от толщины слоев, мы обратили внимание на слоистые композиты из сверхпроводящих сплавов Nb—31 и 50 мас. %Ti [9, 10]. Цель — измерить их критическую плотность тока j_c . В сверхпроводниках 2-го рода j_c зависит от того, насколько эффективно сверхпроводящие вихри закрепляются на дефектах структуры, т.е. критическая плотность тока является такой же, как, например, твердость или прочность, а может быть в большей степени, структурно-зависящей характеристикой материала.

В.В. Шмидт [11] при теоретическом рассмотрении взаимодействия вихрей с плоской поверхностью сверхпроводника показал, что даже бездефектные сверхпроводящие пластины толщиной $d \gg \lambda$, где λ – глубина проникновения внешнего магнитного поля в материал, в смешанном состоянии способны нести значительный ток ~10⁵ A/см². Теперь представим, что толстая пластина заменена набором тонких сверхпроводящих пластин, искусственно отделенных друг от друга слоем нормального металла. В этом случае ток будет течь по каждой из пластин, и в целом многослойный сверхпроводник будет нести большой транспортный ток. Такая ситуация была ре-



Рис. 1. Элементы для сборки пакета и его схематическая конструкция с наружными Nb-фольгами.

ализована в многослойных композитах Cu/Nb [12] и Nb/NbTi [9, 10]. В первом из них слои сверх-проводящего ниобия разделялись слоями нормальной меди, в композите Nb/NbTi роль нормального металла выполнял сверхпроводящий ниобий. Но, так как измерения критического тока проводились в магнитных полях в десятки раз превышавших второе критическое магнитное поле Nb-слоев, то они и были "стопорами" или центрами закрепления сверхпроводящих вихрей, возникающих в (Nb–Ti)-слоях композита.

Доказательством эффективного закрепления вихрей на протяженных тонких слоях меди между Nb-слоями или на тонких слоях ниобия между слоями NbTi-сплава была анизотропия $j_{c\parallel}/j_{c\perp}$ критической плотности тока j_c , измеренной при параллельной (||) и перпендикулярной (\perp) ориентациях плоскости слоев композита и магнитного поля. В композите Nb/Cu $j_{c\parallel}/j_{c\perp} = 410$ в полях 0.5– 0.6 Тл [12]. В композите Nb/NbTi в полях 5–6.5 Тл анизотропия увеличивалась с 3–5, для композитов со слоями толщиной ~140 нм, до 235 для лент с расчетной толщиной слоев ~3 нм. В отдельных же случаях отношение $j_{c\parallel}/j_{c\perp}$ превышало 2000 [9, 10].

Значение работы состоит не только в том, что предлагается твердофазная технология, по которой для получения сверхпроводящего многослойного композита Cu/Nb/Nb50Ti не требуются фольги из уже выплавленного сплава Nb–50 мас. % Ti. В отличие от выше цитируемой работы [10] на 1-м ее этапе многослойные пакеты формировались не из фольг ниобия и нибий-титанового сплава уже нужного состава, а из фольг ниобия и титана: Nb/Ti/...Nb/Ti/Nb. Образование (Nb–Ti)-сплава нужного состава происходило вследствие взаимной диффузии между Nb- и Ti-фольгами в процессе двух диффузионных сварок многослойных пакетов, первоначально состоявших из фольг ниобия, титана и меди.

В предложенной твердофазной технологии получения многослойной ленты из сплава Nb– 50% Ті отсутствуют: выплавка Nb-сплава нужной концентрации и последующий передел его слитка, например, в 6-гранный стержень или фольгу (1), а также длительный в течение 300–320 ч отжиг при 280–300°С в вакууме или инертной среде уже почти готовых композитных ленты или провода способом "в бухте" (2).

Представляемый в работе твердофазный способ ориентирован на получение ленточного многослойного сверхпроводника из (Nb—Ti)-сплава. Но есть также вариант твердофазного получения кабеля из Cu-матрицы с жилами Nb/Nb50Ti.

ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОСЛОЙНОЙ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ ЛЕНТЫ ИЗ СПЛАВА Nb-50Ti

Сверхпроводящую многослойную ленту из сплава Nb—50% Ті, стабилизированную медью, получали за два цикла, каждый из которых состоял из диффузионной сварки пакетов, собранных определенным образом, и прокатки их при комнатной температуре.

В 1-м цикле пакеты собирали из Nb- и Tiфольг и элементов U-образной формы из тех же фольг ниобия и титана. Пакет представлял собой набор из чередующихся Nb- и Ti-слоев. На рис. 1 показана конструкция пакета, наружные слои которого были из ниобия. Толщина Nb-фольг была 50 мкм, Ti-фольг – 45 мкм. Суммарное их количество в пакетах – 61 или 79. Толщина пакетов в собранном виде составляла соответственно 2.9–3.0 и 3.7–3.8 мм.

Пакет представлял собой консолидированную конструкцию, благодаря чему над ним можно было проводить нужные технологические процедуры.

Диффузионная сварка (ДС) пакетов происходила в вакууме не ниже, чем 10^{-4} мм рт. ст. Пакет



Рис. 2. Макро- и микроструктура Nb/Ti-пакета (*a*) и профили концентраций Ti и Nb (*б*) в приграничной области между слоями Nb-твердого раствора и сплава Ti–Nb: 1–6 – точки локального PC-анализа.

находился между пуансонами, изготовленными из высокопрочного графита. Между пакетом и пуансонами прокладывались фольги из ТРГ (терморасщепленного графита) толщиной 0.3 мм. В 1-м цикле сварка Nb/Ti-пакетов проходила при 1050°С в течение 10 мин под давлением 16–17 МПа. Во 2-м цикле пакеты содержали наружные и внутренние прокладки из меди, и, поэтому, температура ДС снижалась до 900–950°С при давлении 17–19 МПа, а время сварки увеличивалось до 1.5–2 ч.

Деформацию прокаткой сваренных пакетов проводили при комнатной температуре на 4-х валковом стане тонкой прокатки. Степень деформации за проход составляла 2–3%. Направление прокатки пакетов соответствовало направлению прокатки заложенных в пакеты фольг. В 1-м цикле лента прокатывалась до толщины 0.2– 0.25 мм и разрезалась на отрезки нужной длины для сборки пакетов во 2-м цикле.

Пакеты собирали из отрезков многослойной ленты после 1-го цикла, двух или трех медных полос толщиной 0.15 мм, как стабилизаторов сверх-проводящего состояния композита, и, соответственно, двух или четырех тонких Nb-фольг толщиной 20 мкм, как диффузионных барьеров. Если отрезков из меди было два, то они располагались снаружи пакета, если три — то один медный отрезок располагался еще и посередине пакета.

Ниобиевые фольги прокладывались между медью и набором из многослойных отрезков после 1-го цикла для предотвращения взаимодействия меди с титаном в процессе последующей ДС. Известно, что ниобий по отношению к меди абсолютно инертен при используемых температурах. После 2-го цикла сваренный пакет прокатывали при комнатной температуре до ленты конечной толщины — 0.1 мм.

Расчетные толщины отдельных слоев твердого раствора титана в ниобии (Nb) и NbTi-сплава в ленте конечной толщины составляли ~150 нм.

СТРУКТУРА МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТОВ

Исследование структуры композитов проводилось с помощью растровой электронной микроскопии и рентгеновского спектрального анализа (РСА). Микроструктурные исследования, включающие получение изображений объектов во вторичных и отраженных (обратно-рассеянных) электронах и РСА, выполнялись на цифровых электронных сканирующих микроскопах Tescan VEGA-II XMU и CamScan MV230 (VEGA TS 5130MM). Оба микроскопа имеют W-катоды, оснашены YAG-детекторами вторичных и отраженных электронов и рентгеновским микроанализатором. Глубина области характеристического рентгеновского излучения достигала 5-6 мкм. На горизонтальном разрезе это соответствовало кругу, а в объеме грушевидной зоне с диаметрами до ~10 мкм.

Структура композитов после 1-го цикла из ДС и прокатки

После 1-й сварки структура Nb/Ti-пакета состояла из светлых и темных слоев (рис. 2). Светлые слои — ниобий. Слои серого цвета — они же на данном рисунке были и наружными слоями титан.

Идентификация слоев устанавливалась с помощью локального РС-анализа (рис. 3*a* и 3*б*). Концентрационные профили вблизи границы

1039



Рис. 3. Структура композитной ленты (Nb)/Nb–Ti толщиной 0,2 мм поперек (*a*) и вдоль прокатки (*б*) после первой ДС и прокатки и концентрационные профили титана и ниобия: 1–6 – точки локального PC-анализа.

между слоями ниобия и титана показали, что в условиях ДС при 1050°С и относительно небольшом давлении было достаточно всего 10 мин, чтобы на месте Ті-слоев образовались слои (Ti–Nb)сплава с концентрациями титана и ниобия, меняющимися в направлении от границы к середине слоя от 56 до 73 и от 44 до 27 мас. % соответственно.

Титан же в слоях ниобия растворялся незначительно. В середине Nb-слоя его концентрация была меньше 0.2 мас. % (рис. 36). Результат показал, что твердофазное взаимодействие между слоями происходило за счет диффузии атомов ниобия в титановый слой. В композите уже после первой сварки сформировалась многослойная структура из слоев сверхпроводящего сплава 25-40% Nb-75-60 мас. % Ті близкого к нужному составу с 50 мас. % Ті, который обладает лучшим сочетанием сверхпроводящих характеристик в системе Nb-Ti. Другие слои должны быть из ниобия с небольшой концентрацией титана, чтобы быть несверхпроводящими в малых магнитных полях. Известно [13], что несверхпроводящие дефекты в сверхпроводниках являются более эффективными центрами закрепления сверхпроводящих вихрей, чем сверхпроводящие дефекты.

Кроме того, на Nb/Ti-границе в (Nb)-слое обнаружено присутствие диффузных образований с аномально большими, 75–85 мас. %, концентрациями титана (точки спектров 7 и 8, см. рис. 3*a*).

На рис. 4 представлена микроструктура поперечного сечения ленты толщиной 0.2 мм после ДС и прокатки. Исходной заготовкой был Nb/Tiкомпозит, содержавший 40 Nb- и 39 Ті-слоев. Светлые слои – это Nb-твердый раствор (Nb), содержаший титан в количестве нескольких десятых долей процента. Темные слои – Nb-сплав с 75-60 мас. % Ті. В направление поперек прокатки ламинарность слоистой структуры выражена в значительно большей степени, чем вдоль прокатки. В сечении, совпадающем с направлением прокатки (рис. 46), в слоях NbTi-сплава присутствовало большое количество образований дискообразной формы. что в значительной степени зависит от холодной прокатки. Есть уверенность, что при правильном подборе ее режима ламинарность слоистой структуры ленты можно значительно улучшить.

Расчетные толщины слоев ниобиевого твердого раствора (Nb) и сплава Ti–Nb в прокатанной ленте после 1-го цикла равнялись соответственно 2.7 и 2.4 мкм. В действительности (см. рис. 4*a*) их толщина варьировалась от нескольких до 10–15 мкм.

Локальный PC-анализ микроструктуры ленты (Nb)/Nb—Ti подтвердил предыдущие результаты. Темные слои титан-ниобиевого сплава содержали ~34.5 мас. % Nb — это средняя концентрация ниобия, рассчитанная по четырем точкам спектра 2, 3, 4 и 6, приходящихся на слои Ti—Nb (рис. 5).



Рис. 4. Макро- и микроструктура пакета с 6-ю отрезками лент после 1-й ДС и прокатки с наружной (*a*) и наружной и внутренней (*б*) стабилизацией: Сu – наружные и внутренний слои; Nb – диффузионные барьеры; 1–6 и 1–3 – ленты (Nb)/(Nb–Ti) после 1-го этапа сварки и прокатки.

Структура композитов после 2-го цикла ДС и прокатки

На рис. 6 представлена макроструктура пакета после сварки во втором цикле при 900–950°С и 16–17 МПа в течение 1–2 ч. Сечение пакета ориентировано параллельно направлению прокатки.



Рис. 5. Локальный РС-анализ пакета Cu/Nb/[(Nb)/(Ti-50Nb)] после 2-й ДС: ▲ – Nb, □ – Ti и ○ – Cu, 1–19 – точки анализа, внизу-слева – область характеристического рентгеновского излучения радиусом ~5 мкм.

Пакет состоял из 6-ти многослойных отрезков ленты (Nb)/(Nb—Ti) после 1-го цикла (см. 1, 2, 3, 4, 5 и 6), двух наружных Сu-обкладок и Nb-фольг, служивших диффузионными барьерами в процессе сварки пакета (см. вставку). Локальный PC-анализ (рис. 7), проведенный на одном из участков его сечения, при большом увеличении показал, что стабилизирующие обкладки на 100% состоят из меди, а диффузионные барьеры на 100% из ниобия.

С точки зрения сверхпроводимости представляют интерес две области, отмеченные на верхнем рис. 7, как "Nb-Ti", находящихся по обе стороны от дискообразного включения со сплавом ~35Nb и ~65 мас. % Ті (точки спектра 11, 12 и 13). По данным локального РС-анализа в них можно выделить как точки анализа с эквиатомными концентрациями ниобия и титана, что соответствует слоям сплава 50Nb-50Ti, так и точки анализа с титаном в количестве от 10 до нескольких мас. %, соответствующие слоям твердого раствора титана в ниобии. Собственно, это и есть области, ответственные за сверхпроводящие свойства композитной ленты. Они состоят из тонких слоев сплава Nb-50 мас. %Ті, которые в первых пакетах были Ті-фольгами, и (Nb)-слоев с очень малыми концентрациями титана, бывших Nb-фольгами. Точно определить содержания элементов в таких тонких объектах не представляется возможным, так как их толщины сопоставимы с диаметром области характеристического рентгеновского излучения, равным ~10 мкм.

На рис. 8 показаны структуры двух других пакетов после диффузионных сварок во 2-м цикле. Первый из них толщиной 1.5 мм имеет семь многослойных отрезков (Nb)/(Nb-Ti) после 1-го цикла, два наружных Си-стабилизаторов толщиной 0.15 мм и два Nb-экрана толщиной 20 мкм. Второй пакет толщиной 2 мм, кроме двух наружных



Рис. 6. Окончательная структура сверхпроводящих лент толщиной 0.1 мм на основе сплава Nb–50 мас. % Ті с наружными (*a*) и наружными и внутренним (*б*) стабилизирующими слоями.



Рис. 7. Вольтамперные характеристики многослойной сверхпроводящей ленты из сплава Nb-50Ti при $H \parallel (ab)$ и H = 1, 2 и 3 Tл (*a*) и зависимости I_C от напряженности магнитного поля H при $H \parallel (ab)$ и $H \perp (ab)$ (*b*).

стабилизаторов из меди, содержал такую же Сипластину для внутренней стабилизации сверхпроводящего состояния и, соответственно, еще два Nb-диффузионных барьера. Сверхпроводящий объем композита представлен двумя пачками из 4-х многослойных отрезков ленты (Nb)/(Nb-Ti) после 1-го цикла.

Объемы с 2-фазной слоистой структурой, ответственные за сверхпроводящее состояние в 1-м и 2-м композитах, определявшиеся по цветовому окрашиванию функциональных структурных элементов, составляли соответственно 79.5 и 70.2 об. %.

Пакеты после 2-й сварки прокатывали до толщины 0.1 мм. Микроструктуры таких лент приведены на рис. 6. При анализе приведенных в работе макро- и микроструктур создавалось визуальное представление, что их слоистый характер, связность и непрерывность определяется только светлой компонентой, в которой концентрация титана в лучшем случае не превышала 10–15 мас. %. Значительно чаще его содержится от 1 до 3–4 мас. %. Компонента же серого цвета из ниобиевого сплава с титаном в количестве 50–70 мас. % образует вытянутые, нередко в форме дисков прерывающиеся включения. Отсюда напрашивался вывод, что сплав ниобия, ответственный за высокий сверхпроводящий ток слоистого композита, не имеет связных токовых путей.

Микроструктуры тонких многослойных лент после двух циклов диффузионной сварки и прокатки, опровергают описанные выше представления. После прокатки слоистая структура лент представляется состоящей из непрерывающихся слоев (Nb–Ti)-сплава серого и темно-серого контрастов и светлых слоев Nb-твердого раствора с малым содержанием титана.

ТОКОНЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КОМПОЗИТНОЙ ЛЕНТЫ

Критический ток измеряли на образцах многослойной ленты после 2-го цикла из ДС и прокатки. Толщиной ленты – 0.1 мм, ширина – 1 мм. Измерения проводились в криостате с жидким гелием в магнитном поле H, создаваемом сверхпроводящим соленоидом, при перпендикулярной $H \perp (ab)$ и параллельной $H \parallel (ab)$ ориентациях направления магнитного поля H и плоскости прокатки ленты (ab). Транспортный ток I через образец в обоих случаях был перпендикулярен магнитному полю соленоида: $I \perp H$.

Вольт-амперные характеристики многослойных лент в полях 1, 3 и 5 Тл при $H \parallel (ab)$ представлены на рис. 7*a*. В магнитных полях 5 и 3 Тл критический ток ее равнялся соответственно 30 и 75 А на 1 мм ширины ленты. В поле 1 Тл транспортный ток, равный 180 А, не разрушал сверхпроводящее состояние образца.

Зависимости критического тока I_C от магнитного поля при двух его ориентациях относительно плоскости прокатки ленты — $H \perp (ab)$ и $H \parallel (ab)$ показаны на рис. 76. Две экспериментальные точки со "стрелками вверх" показывают, что транспортный ток такой силы не разрушил сверхпроводящее состояние ленты.

При $H \perp (ab)$ критический ток I_C резко падал с увеличением магнитного поля уже в диапазоне от 0 до 1 Тл. В то время как при ориентации $H \parallel (ab)$ он плавно понижался, оставаясь при 5 Тл на уровне ~30 А, что соответствует конструктивной (или инженерной) критической плотности тока, равной $3 \cdot 10^4$ А/см². Анизотропия I_C , равная отношению $I_{C\parallel}/I_{C\perp}$, рассчитанная для H = 1 Тл, была >82. Это свидетельствует о том, что закрепление сверхпроводящих вихрей, локализующихся в (Nb–Ti)слое, который несет транспортный ток, происходит в несверхпроводящих слоях Nb-твердого раствора (Nb).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В многожильных сверхпроводниках из (Nb-Ti)-сплава промышленного изготовления центрами закрепления являются частицы α-фазы, которые выделяются при многочасовых низкотемпературных отжигах готовых композитов в виде кабеля или ленты. В композитном сверхпроводящем материале Cu/Nb/NbTi твердофазного изготовления, в которых закрепление вихрей происходит на несверхпроводящих (Nb)-слоях, высокая критическая плотность тока в сплаве Nb—Ti достигалась без низкотемпературного отжига, то есть из существующей технологии получения сверхпроводящего материала отжиг полностью исключен.

Еще более значимым является использование твердофазной технологии приготовления композита Cu/Nb/Nb50Ti, по сравнению с энергетически более затратной гарнисажной выплавкой слитков сплава Nb–50 мас. % Ti и их передела в составную заготовку сложной конструкции.

На основании проведенного рентгеновского структурного анализа и измерений токонесущей способности слоистых лентах можно сделать заключение, что в многослойном Nb/Ti-композите в результате твердофазного взаимодействия между слоями ниобия и титана за два цикла формируются слои сверхпроводящего Nb-сплава с 50 мас. % Ti.

Слои сплава Nb50Ti способны проводить большой электрический ток в магнитных полях \geq 5 Tл. Прослойки Nb-твердого раствора с низкими концентрациями титана переходят в нормальное состояние уже в малых магнитных полях и становятся эффективными центрами закрепления сверхпроводящих вихрей. Это подтверждается большой анизотропией критического тока $I_{\rm CV}/I_{\rm CL} > 82$ при H = 1 Тл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Демихов Е.И., Лысенко В.В., Костров Е.А. и др. // Научн. приборостр. 2017. Т. 27. № 1. С. 19.
- Металловедение и металлофизика сверхпроводников. Труды I совещ. по металловед. и металлофиз. сверхпроводников. М.: Наука, 1965. 168 с.
- Металловедение, физикохимия и металлофизика сверхпроводников. Труды II и III совещ. по металловед., физикохим. и металлофиз. сверхпроводников. М.: Наука, 1967. 188 с.
- Физикохимия, металловедение и металлофизика сверхпроводников. Труды IV Всесоюзн. совещ. по физикохим., металловед. и металлофиз. сверхпроводников. М.: Наука, 1969. 160 с.
- Проблемы сверхпроводящих материалов. Труды V Всесоюзн. совещ. по физикохим., металловед. и металлофиз. сверхпроводников. М.: Наука, 1970. 232 с.
- Сверхпроводящие сплавы и соединения. Труды VI Всесоюзн. совещ. по пробл. сверхпровод. мат. М.: Наука, 1972. 208 с.
- Структура и свойства сверхпроводящих материалов. М.: Наука, 1974. 184 с.
- Физикохимия сверхпроводников. М.: Наука, 1976. 136 с.

- 9. *Карпов М.И., Коржов В.П., Внуков В.И., Зверев В.Н. //* Изв. вузов. Физ. 2010. №3/2. С. 144.
- 10. Коржов В.П., Карпов М.И., Зверев В.Н. // ЖОХ. 2010. Т. 80 № 6. С. 933.
- 11. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. М.: Наука, 1982. 240 с.

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ

- 12. *Карпов М.И., Коржов В.П., Внуков В.И. и др.* // Материаловедение. 2005. № 1. С. 43.
- 13. *Karpov M.I., Korzhov V.P., Prokhorov D.V. et al.* / J. Int. Sci. Publ. Mater. Meth. Technol. 2014. V. 8. P. 177.
- Баранов И.А., Бычков Ю.Ф., Коржов В.П. и др. Сверхпроводящие сплавы и соединения. М.: Наука, 1972. С. 140.

Superconductive multi-layer tape for medical MR-tomographs, manufactured by solid phase technology

V. P. Korzhov^{*a*, *}, V. N. Zverev^{*a*}

^aInstitute of Solid State Physics RAS, Chernogolovka, 142432 Russia *e-mail: korzhov@issp.ac.ru

We present a solid-phase technology for producing a superconducting multilayer tape with layers ~150 nm thick from a solid solution of Ti in Nb and an Nb-50% Ti alloy. Belt thickness -0.1 mm. Measurements of the critical current of the obtained ribbons at perpendicular and parallel orientations of the external magnetic field *H* relative to the plane of the layers showed a large anisotropy in magnetic fields H > 1 T. This indicated that the superconducting vortices were pinned on the nonsuperconducting layers of the Nb solid solution. The critical current in a field of 5 T reached 50 A per 1 mm of tape width.