Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление «Физика конденсированного состояния»

УДК [UDC] 621.774.37:539.319
DOI 10.17816/transsyst20195231-46

© В.П. Коржов, В.Н. Зверев
Институт физики твердого тела РАН
(Черноголовка, Московская обл., Россия)

МНОГОСЛОЙНАЯ СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ ЛЕНТА СПЛАВА Nb50Ti, ПОЛУЧЕННАЯ ИЗ КОМПОЗИТА Cu/Nb/Ti ТВЕРДОФАЗНЫМ СПОСОБОМ

Цель: Создание многослойной сверхпроводящей ленты из ниобий-титанового сплава.

Методы: Методами диффузионной сварки и пакетной прокатки за два цикла изготовлены опытные образцы многослойной ленты на основе сверхпроводящего сплава Nb–50%Ti. В качестве стабилизатора сверхпроводящего состояния проводника использовалась медь. На начальном этапе из фольг ниобия и титана собирался многослойный пакет Nb/Ti. Медные стабилизирующие слои закладывались в пакет во 2-м цикле изготовления ленты. Взаимодействие между ниобием и титаном происходило, в основном, за счет диффузии ниобия в слои титана с образованием на их месте сплава Nb–50%Ti.

Результаты: Измерения критического тока I_c при параллельной и перпендикулярной ориентации магнитного поля относительно плоскости слоев в композите показали большую анизотропию I_c, что было результатом закрепления сверхпроводящих вихрей преимущественно на границах NbTi-сплава и Nb-твердого раствора. В целом композит был способен проводить большой электрический ток в магнитных полях 5–6 Тесла без длительного низкотемпературного отжига для выпадения α-фазы, который необходим в случае композитов из ниобий-титановых сплавов, получаемых по известной технологии.

Ключевые слова: сверхпроводящая лента, многослойный композит, сплав Nb–Ti, твердофазный способ, взаимная диффузия, пакетная прокатка, критический ток, сверхпроводящий вихрь, пиннинг.

Received: 21.05.2019 **Revised: 29.06.2019** **Accepted: 15.07.2019**
Поступила: 21.05.2019 **Одобрена: 29.06.2019** **Принята: 15.07.2019**

Rubric 2: SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field “Condensed matter physics”

© Valery P. Korzhov, Vladimir N. Zverev
Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences
(Chernogolovka, Moscow Oblast, Russia)

MULTILAYER SUPERCONDUCTING Nb50Ti ALLOY TAPE, OBTAINED FROM THE COMPOSITE Cu/Nb/Ti THROUGH SOLID-PHASE METHOD

Aim: Creation of multilayer superconducting tape made of Nb-Ti alloy.

Methods: Using the methods of diffusion welding and packet rolling, for two cycles the prototypes of a multilayer tape based on a superconducting Nb–50% Ti alloy were made. Copper was used as a stabiliser of the superconducting state of the conductor. At the initial stage, a multilayer Nb-Ti pack was assembled from niobium and titanium foils. Copper stabilising layers were laid in the pack in the 2nd cycle of tape manufacturing. The mutual diffusion between the Nb- and Ti-layers took place generally at the expense of niobium diffusing into the layers of titanium, with the Nb-50 % Ti alloy emerging in their place.

Results: Measurements of the critical current I_c with a perpendicular and parallel orientation of the magnetic field relative to the plane of the layers in the composite showed large anisotropy of I_c, which was the result of the superconducting vortices fixing exclusively at the boundaries of the Nb-Ti-alloy and the Nb-solid solution. In general, the composite was capable of carrying large current in magnetic fields of 5-6 T without long-lasting low-temperature annealing for α-phase deposition, which is necessary in the case of Nb-Ti alloy composites produced by the known technology.

Keywords: superconducting tape, multilayer composite, Nb–Ti alloy, solid-phase method, mutual diffusion, batch packet rolling, critical current, superconducting vortex, pinning.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивность исследований сверхпроводящих сплавов ниобий-титан приходится на период 1960–1970-х годов. В те годы проблеме сверхпроводящих сплавов вообще и NbTi, в частности, посвящались регулярные конференции, проводимые в ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН. Развитие этих исследований можно проследить в издаваемых в те годы сборниках статей конференций, а также двух сборниках статей ведущих научных коллективов страны под редакцией член-корреспондента АН СССР Е.М. Савицкого и его коллег [1–7]. В СССР эти исследования воплотились в разработку промышленной технологии получения многожильных сверхпроводящих материалов на основе сплава Nb–50Ti, пережившей, уже в XXI-м веке, свое новое возрождение. Но в настоящее

Received: 21.05.2019 **Revised: 29.06.2019** **Accepted: 15.07.2019**
Поступила: 21.05.2019 **Одобрена: 29.06.2019** **Принята: 15.07.2019**

время исследовательские работы по сверхпроводящим сплавам NbTi почти не ведутся.

Исследуя целый ряд многослойных материалов, получаемых с помощью пакетной прокатки, на предмет зависимости их механических свойств от толщины слоев, нами были получены композиты ниобия со сверхпроводящими сплавами Nb–31 и 50 мас.%Ti – Nb/Nb31Ti и Nb/Nb50Ti [8, 9]. Целью было измерить критическую плотность тока j_c в зависимости от толщины слоев (Nb–Ti)-сплавов. Оказалось, что зависимость $j_c(t)$, где t – толщина слоя сверхпроводника, подчинялась соотношению Холла-Петча, если прочность σ заменить критической плотностью тока, а размер зерна – толщиной сверхпроводящего слоя.

Что касается сверхпроводимости выбранных композитов, то известно, что в сверхпроводниках 2-го рода критическая плотность тока j_c зависит от того, насколько эффективно сверхпроводящие вихри будут закрепляться на дефектах структуры, то есть j_c является такой же, а может быть в большей степени, как и твердость или прочность, структурно-зависящей характеристикой материала. В.В. Шмидт [10] при теоретическом рассмотрении взаимодействия вихрей с плоской поверхностью сверхпроводника показал, что даже бездефектные сверхпроводящие пластины толщиной $d >> \lambda$ (λ – глубина проникновения внешнего магнитного поля) в смешанном состоянии способны нести значительный ток ~10^5 А/см^2. 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 по всему сечению многослойного сверхпроводника будет идти большой ток. Именно такая ситуация была реализована сначала в многослойных композитах Cu/Nb [11], а потом Nb/NbTi [8, 9]. В первом из них слои из сверхпроводящего ниобия разделялись слоями нормальной меди. Роль нормального металла во 2-м композите выполнял ниобий, так как измерения критических токов сверхпроводящих лент из (Nb–Ti)-сплавов проводились в магнитных полях, во много раз превышавших его второе критическое магнитное поле.

Доказательством эффективного закрепления сверхпроводящих вихрей на протяженных границах между слоями ниобия и меди или слоями ниобия и сплава Nb–Ti была анизотропия j_c, измеренная при параллельной (||) и перпендикулярной (⊥) ориентациях плоскости слоев композита и магнитного поля $j_{c||}/j_{c\perp}$. В композите Nb/Cu $j_{c||}/j_{c\perp} = 410$ в полях 0,5–0,6 Тл [11]. В Nb/NbTi в полях 5–6,5 Тл анизотропия увеличивалась с 3–5, для композитов со слоями толщиной ~140 нм, до 235 для композитных лент с толщиной слоев ~3 нм. В отдельных же случаях отношение $j_{c||}/j_{c\perp}$ превышало 2000 [8, 9].

Received: 21.05.2019 Revised: 29.06.2019 Accepted: 15.07.2019
Поступила: 21.05.2019 Одобрена: 29.06.2019 Принята: 15.07.2019

В данной работе для получения сверхпроводника из сплава NbTi предлагается обходиться без использования плавильного способа гарниссажной плавки – достаточно дорого и трудоемкого процесса. Формирование сплава Nb–50%Ti будет происходить в процессе двух циклов, состоящих из диффузионной сварки и пакетной прокатки, с использованием на начальном этапе Nb/Ti-пакетов с фольгами из чистых металлов.

Надо заметить, что прокатка пакетов оказывает положительное влияние на формирование слоя NbTi-сплава. В процессе прокатки внутри слоистого композита, который вытягивается в длину в несколько раз, высвобождаются атомно чистые, так называемые, ювенильные поверхности соприкасающихся однородных и разнородных металлов [12]. При прокатке эти поверхности сближаются на расстояния действия межатомных сил, и в результате образования металлических связей происходит их сцепление. При пластических деформациях это явление называется схватыванием. Способность металлов к схватыванию является физическим свойством ювенильных поверхностей. В идеальных условиях термодинамики схватывание является выгодным процессом и должно происходить самопроизвольно, так как энергия системы из соединенных металлов становится меньше за счет ликвидации свободных поверхностей. Под идеальными условиями понимается сближение поверхностей, свободных от окисных и адсорбированных пленок на расстояние, равное сумме радиусов атомов соединяемых поверхностей. Предпринимаемая прокатка и является одним из способов получения ювенильных поверхностей.

В нашем же случае образование ювенильных поверхностей полезно ещё и тем, что через них более беспрепятственно осуществлялась взаимная диффузия разнородных атомов по сравнению с тем, если бы прокатка не предпринималась.

Методика получения и исследования структуры проводника

Диффузионная сварка пакетов и пакетная прокатка.

Для получения сверхпроводящей ленты на основе сплава Nb–Ti использовались диффузионная сварка (ДС) многослойных пакетов (рис. 1) под давлением в вакууме и последующая их пакетная прокатка (ПП) при комнатной температуре.

ДС пакетов проводилась в вакууме не ниже, чем 10^{-4} мм рт. ст. Свариваемый пакет располагался между пуансонами, изготовленными из высокопрочного графита. Между пакетом и пуансонами прокладывались фольги из терморасщепленного графита (ТРГ) толщиной 0,3 мм. В 1-м цикле сварка Nb/Ti-пакетов проходила при 1050°С в течение 10 мин под

Received: 21.05.2019 Revised: 29.06.2019 Accepted: 15.07.2019
Поступила: 21.05.2019 Одобрена: 29.06.2019 Принята: 15.07.2019

давлением 16–17 МПа. Во 2-м цикле сваривались пакеты, содержавшие наружные и внутренние прокладки из меди, и, поэтому, температура ДС снижалась до 900–950°С при давлении 17–19 МПа, а время сварки повышалось до 1,5–2 ч.

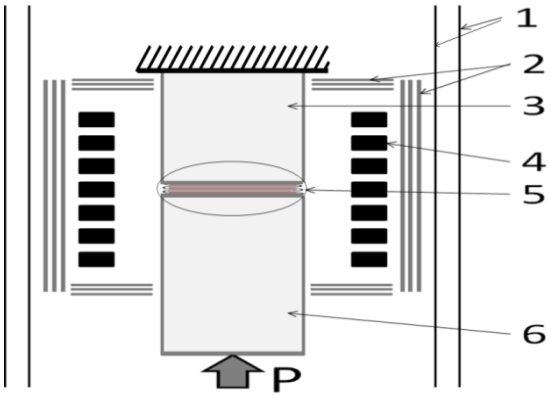


Рис. 1. Взаимное расположение основных узлов установки для ДС:
1 – водоохлаждаемый корпус камеры, 2 – набор тепловых экранов из прессованной графитовой ваты и Mo-фольги, 3 – неподвижный пуансон, 4 – нагреватель из высокопрочного графита, 5 – испытуемый пакет, 6 – подвижный пуансон, Р – усилие

Деформация прокаткой сваренных пакетов проводилась 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 Nb- и Ti-фольг. В 1-м цикле лента прокатывалась до толщины 0,2–0,25 мм, разрезалась на отрезки нужной длины, из которых собирался новый пакет требуемой конструкции для 2-го цикла. После 2-го цикла сваренный пакет прокатывался до ленты конечной толщины – 0,1 мм.

Исследование структуры материала. Микроструктура композитов исследовалась с помощью растровой электронной микроскопии и рентгеновского спектрального анализа (РСА). Исследования, включающие получение изображений объектов во вторичных и отраженных электронах и РСА, выполнялись на цифровых электронных сканирующих микроскопах Tescan VEGA-II XMU и CamScan MV230 (VEGA TS 5130MM). Оба микроскопа имеют W-катоды, оснащены YAG-детекторами вторичных и отраженных электронов и рентгеновским микроанализатором.

Исследования выполнялись при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе электронного зонда 200 пА на образце кобальта. Размер электронного зонда – 0,16 мкм. Глубина области характеристического рентгеновского излучения достигала 5–6 мкм. На горизонтальном разрезе это

Received: 21.05.2019 Revised: 29.06.2019 Accepted: 15.07.2019
Поступила: 21.05.2019 Одобрена: 29.06.2019 Принята: 15.07.2019

соответствовало кругу, а в объеме – грушевидной зоне с наибольшим диаметром около 10 мкм.

Структура многослойных композитов

Сборка пакетов. Сверхпроводящую многослойную ленту из сплава Nb–50%Ti, стабилизированную медью, получали за два цикла, каждый из которых состоял из диффузионной сварки и пакетной прокатки.

Сборка пакетов в 1-м цикле проводилась из элементов U-образной формы, изготавливаемых заранее из фольг ниобия и титана, и отдельных фольг титана и ниобия [13]. Соблюдая определенную последовательность, можно было относительно просто и быстро собирать пакеты из десяти, двадцати и более ниобиевых элементов, чередующихся с Ti-фольгами, или титановых элементов, чередующихся с Nb-фольгами. Пакет представлял собой единую конструкцию, благодаря чему с ним можно было производить нужные технологические процедуры. Отдельные составляющие исходных пакетов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Составляющие Nb/Ti-пакетов в 1-м цикле ДС и ПП

Обозначение пакета	**Составляющие пакетов: количество (шт.) и толщина (t) фольг**	**Общее кол-во фольг в пакете, шт.**
13TiNb1	1. 20 U-элементов из Ti-фольги t = 45 мкм 2. 39 Nb-фольг t = 45–50 мкм	40 39
13NbTi2	1. 20 U-элементов из Nb-фольги t ≈ 50 мкм 2. 39 Ti-фольг t = 45 мкм	40 39
13TiNb3	1. 10 U-образных элементов из Nb-фольги + 10 Nb-фольг t ≈ 50 мкм 2. 11 U-образных элементов из Ti-фольги + 9 Ti-фольг t = 45 мкм	20 + 10 = 30 22 + 9 = 31
13NbTi4	1. 10 U-образных элементов из Ti-фольги + 10 Ti-фольг t = 45 мкм 2. 11 U-образных элементов из Nb-фольги + 9 Nb-фольг t ≈ 50 мкм	20 + 10 = 30 22 + 9 = 31

В 1-м цикле пакеты содержали по 31 и 40 слоев из ниобия и на один меньше слоев из титана или по 31 и 40 слоев из титана и на один меньше слоев из ниобия. Наружными слоями пакетов были только Nb- или только Ti-слои. Толщина пакетов составляла 2,9–3,0 и 3,7–3,8 мм соответственно.

Во 2-м цикле пакеты собирались в определенной последовательности из нескольких отрезков ленты, полученной после 1-го цикла, двух или трех пластин из меди толщиной 0,15 мм и соответственно 2-х или 4-х Nb-фольг толщиной 20 мкм, прокладываемых между медными пластинами и

Received: 21.05.2019 Revised: 29.06.2019 Accepted: 15.07.2019
Поступила: 21.05.2019 Одобрена: 29.06.2019 Принята: 15.07.2019

отрезками после 1-го цикла. Эти Nb-фольги были диффузионными барьерами против взаимодействия меди и титана, находящегося в сплаве Nb–Ti.

Если пластин из меди, как стабилизатора, было две, то они располагались снаружи пакета, если – три, то одна пластина располагалась еще и посередине пакета.

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

Многослойная структура композитов после 1-го цикла. После 1-й сварки структура Nb/Ti-пакета состояла из чередующихся светлых и темных полос, параллельных друг другу (рис. 2). Светлые полосы соответствовали ниобию, темные – титану.

Точная идентификация слоев проводилась с помощью локального РС-анализа. Концентрационные профили вблизи границы между слоями ниобия и титана (рис. 3, *а* и *б*) показали, что в условиях ДС при 1050°С и относительно небольшом давлении было достаточно 10 минут, чтобы на месте Ti-слоев образовались слои ниобий-титанового сплава. Концентрация Nb в них в направлении от границы к середине слоя уменьшалась в интервале от 44 до 27 мас.%. Концентрация Ti увеличивалась от 56 до 73 мас.%. Кроме того на самой границе между слоями отмечено присутствие диффузных образований с 75–85 мас.%Nb (спектры 7 и 8, см. рис. 3, *а*).

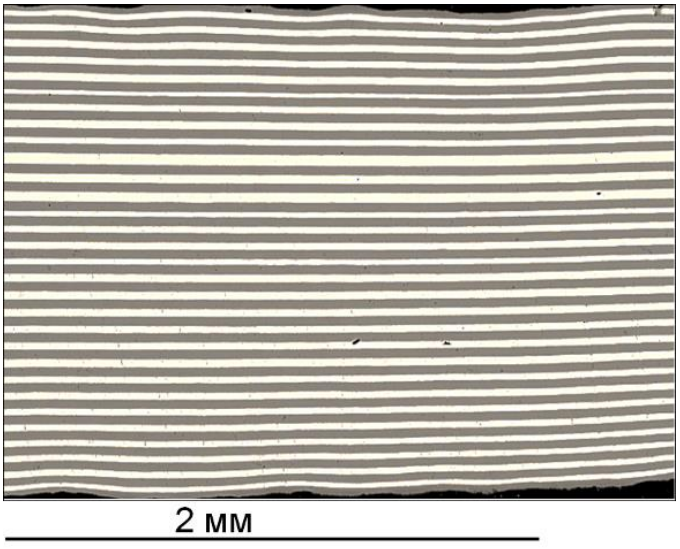
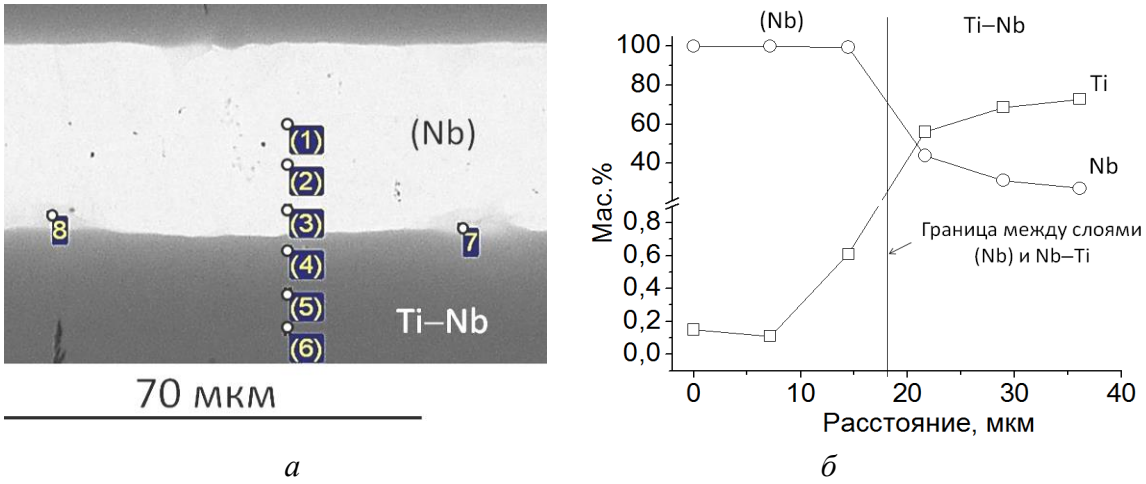


Рис. 2. Макроструктура поперечного сечения пакета Nb/Ti, содержащего 31 Ti-слой и 30 Nb-слоев после ДС в 1-м цикле (см. табл.1, 13TiNb3)

Received: 21.05.2019 **Revised: 29.06.2019** **Accepted: 15.07.2019**
Поступила: 21.05.2019 **Одобрена: 29.06.2019** **Принята: 15.07.2019**



а *б*

Рис. 3. К результатам локального рентгеноспектрального анализа: фрагмент микроструктуры (*а*) и концентрационные профили титана и ниобия (*б*) на границе между слоями из ниобиевого твердого раствора (Nb) и сплава Nb–Ti

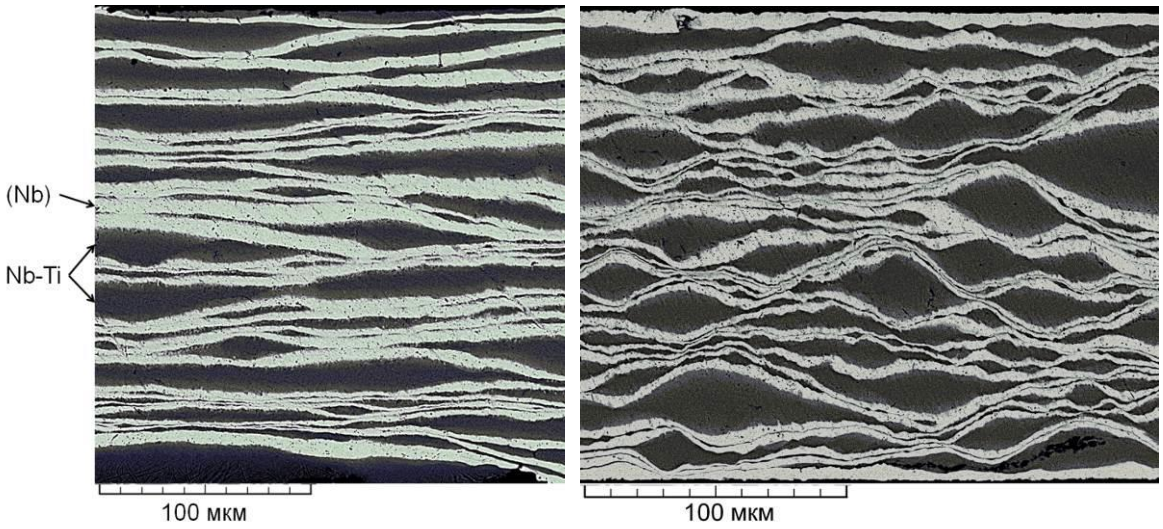
Титан же в слоях ниобия растворялся совсем незначительно – в середине Nb-слоя он содержался в количестве меньше 0,2 мас.% (см. рис. 3, *б*). Это означало, что твердофазное взаимодействие между слоями происходило за счет диффузии ниобия в титан и оказывало положительное влияние на формирование в композите слоистой структуры, одним из слоев которой должен быть слой сверхпроводящего сплава Nb–Ti, близкий к сплаву с 50 мас.%Ti. Сплав Nb–50Ti обладает лучшим сочетанием сверхпроводящих характеристик в системе Nb–Ti. Другими слоями должны быть слои из ниобия с как можно меньшим содержанием титана. Тогда они будут несверхпроводящими уже в малых магнитных полях. Известно [14], что несверхпроводящие дефекты являются более эффективными центрами закрепления сверхпроводящих вихрей, чем сверхпроводящие.

На рис. 4 представлена структура поперечного сечения многослойной ленты толщиной ~0,2 мм после ДС и прокатки. Исходной заготовкой был Nb/Ti-композит 13NbTi2, содержавший 40 Nb- и 39 Ti-слоев (см. табл. 1). Светлые слои – это Nb-твердый раствор (Nb), содержащий титан в количестве нескольких десятых долей процента. Темные слои – сплав Nb–(70–80) мас.%Ti. Оказалось, что в направлении поперек прокатки ламинарность слоистой структуры выражена лучше, чем вдоль неё. В сечении, совпадающем с направлением прокатки (см. рис. 4, *б*), в слоях NbTi-сплава присутствует большое количество образований линзообразной формы.

Расчетные толщины слоев (Nb) и Nb–Ti в прокатанной ленте после 1-го цикла равнялись соответственно 2,7 и 2,4 мкм. Но в действительности их толщина варьировалась от нескольких до 10–15 микрон (см. рис. 4).

Received: 21.05.2019 Revised: 29.06.2019 Accepted: 15.07.2019
Поступила: 21.05.2019 Одобрена: 29.06.2019 Принята: 15.07.2019

Рентгеновский спектральный анализ поперечного сечения ленты (Nb)/Nb–Ti подтвердил предыдущие результаты. Темные слои ниобий-титанового сплава содержали ~34,5 мас.%Nb – это средняя концентрация ниобия, рассчитанная по четырем спектрам 2, 3, 4 и 6, приходящихся на слои Nb–Ti (рис. 5).



а *б*

Рис. 4. Микроструктура Nb/Ti-композитной ленты толщиной 0,2 мм после ДС и ПП после 1-го цикла поперек (*а*) и вдоль прокатки (*б*).

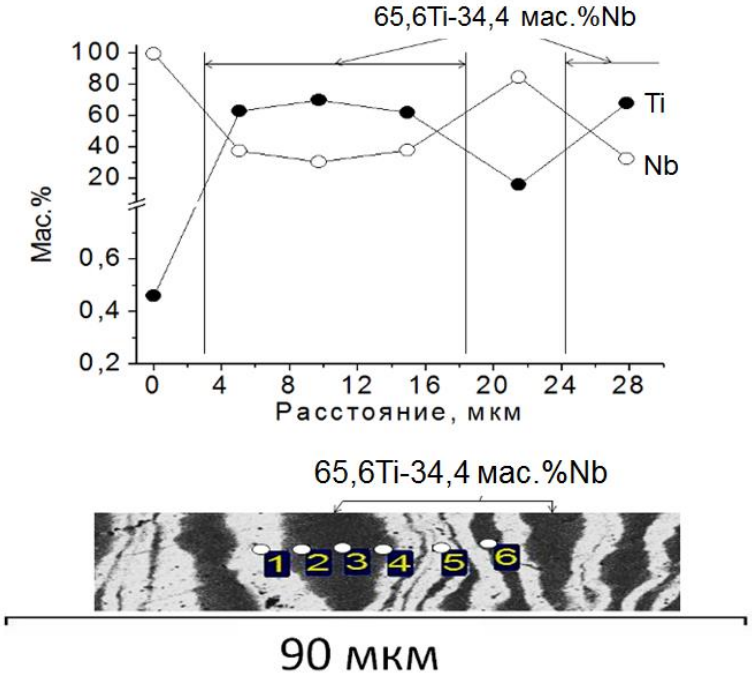
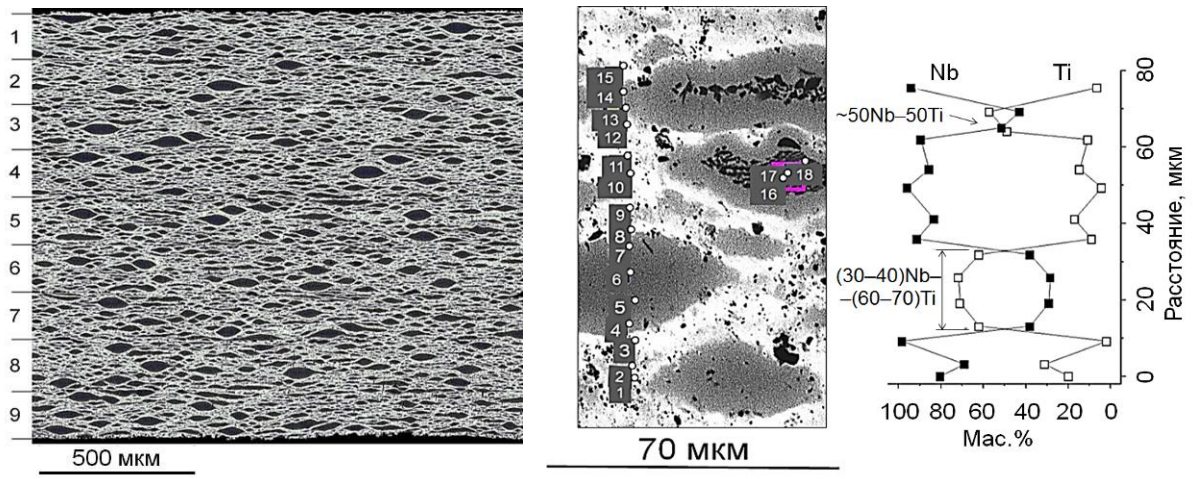


Рис. 5. К результатам локального РСА: концентрационные профили титана и ниобия и фрагмент микроструктуры Nb/Ti-композита 13NbTi2 после ДС и ПП 1-го цикла

Received: 21.05.2019 Revised: 29.06.2019 Accepted: 15.07.2019
Поступила: 21.05.2019 Одобрена: 29.06.2019 Принята: 15.07.2019

2-й цикл. На рис. 6 представлена макроструктура пакета, собранного во 2-м цикле из 9 отрезков ленты после 1-го цикла, и результаты локального РС-анализа, проведенного на одном из участков его сечения при большом увеличении. Рассматриваемое сечение пакета ориентировано параллельно направлению прокатки фольг ниобия и титана.



а *б*

Рис. 6. 2-й цикл: *а* – макроструктура поперечного сечения пакета из 9 отрезков ленты после 1-го цикла; *б* – результаты РСА. ДС: 950°С при 19 МПа в течение 2 ч

При анализе приведенных макро- и микроструктур композита визуально видно, что слоистый характер ее определяется светлой компонентой материала, в которой содержание титана в лучшем случае не превышает 10–15 мас.%. Значительно чаще его содержится в ней от 1 до 3–4 мас.%. Эта компонента создает связную непрерывную систему. Компонента серого цвета из ниобиевого сплава с содержанием титана 50–70 мас.% образует вытянутые включения, приобретающие нередко дискообразную форму и, поэтому, кажущиеся прерывистыми. Отсюда напрашивается ошибочный вывод, что сплав ниобия, ответственный за высокий сверхпроводящий ток проводника, не имеет связных токовых путей.

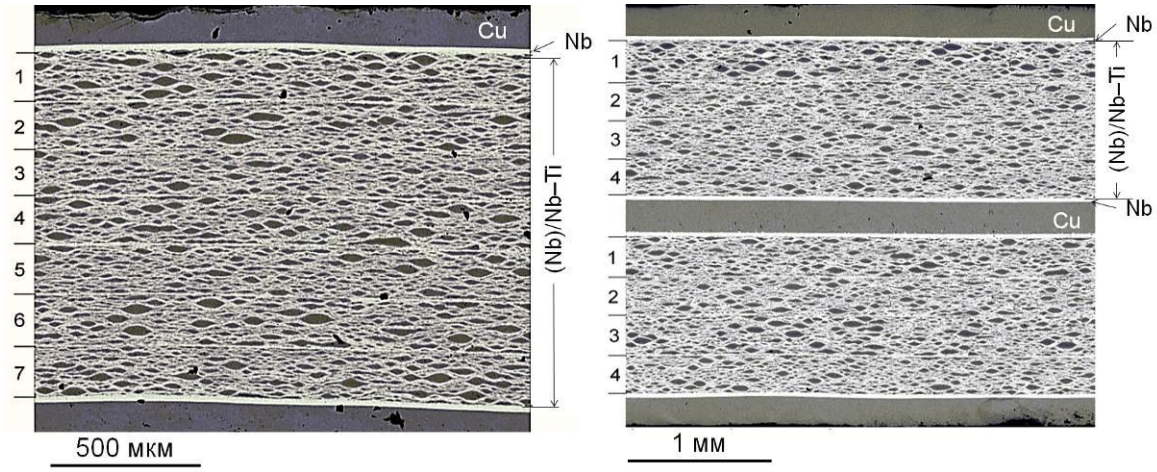
В средней области некоторых утолщений отмечено присутствие включений, отличающихся от окружающего объема своим черным цветом (спектры 16–18, см. рис. 6, *б*). Они обогащены титаном. Их состав: 21–24Nb и 79–76 мас.%Ti.

Измерения критического тока

Низкотемпературные измерения проводились на лентах, полученных прокаткой композитов из отрезков многослойной ленты после 1-го цикла, Cu-полос как стабилизатора и тонких Nb-фольг, прокладываемых между

Received: 21.05.2019 Revised: 29.06.2019 Accepted: 15.07.2019
Поступила: 21.05.2019 Одобрена: 29.06.2019 Принята: 15.07.2019

отрезками после 1-го цикла и медью. Структуры двух таких композитов, ещё не подвергавшихся прокатке, показаны на рис. 7. Первый состоит из семи многослойных отрезков (Nb)/Nb–Ti, двух наружных Cu-обкладок и двух Nb-прослоек. Второй композит, кроме двух наружных, содержит еще внутренний Cu-слой, две пачки из сложенных вместе 4-х многослойных отрезков (Nb)/Nb–Ti и четыре Nb-прослойки, которые расположены между Cu и (Nb)/Nb–Ti. Проводящие сверхпроводящий ток объемы с 2-фазной слоистой структурой (Nb) + Nb–Ti в 1-м и 2-м композитах составляют 79,6 и 75,3 об.%.



а *б*

Рис. 7. Структура композитов после ДС во 2-м цикле:
а – 2 Cu-слоя, 2 Nb-прослойки и 7 отрезков ленты (Nb)/Nb–Ti после 1-го цикла;
б – 3 Cu-слоя, 4 Nb-прослойки и 2 пачки по 4 отрезка (Nb)/Nb–Ti

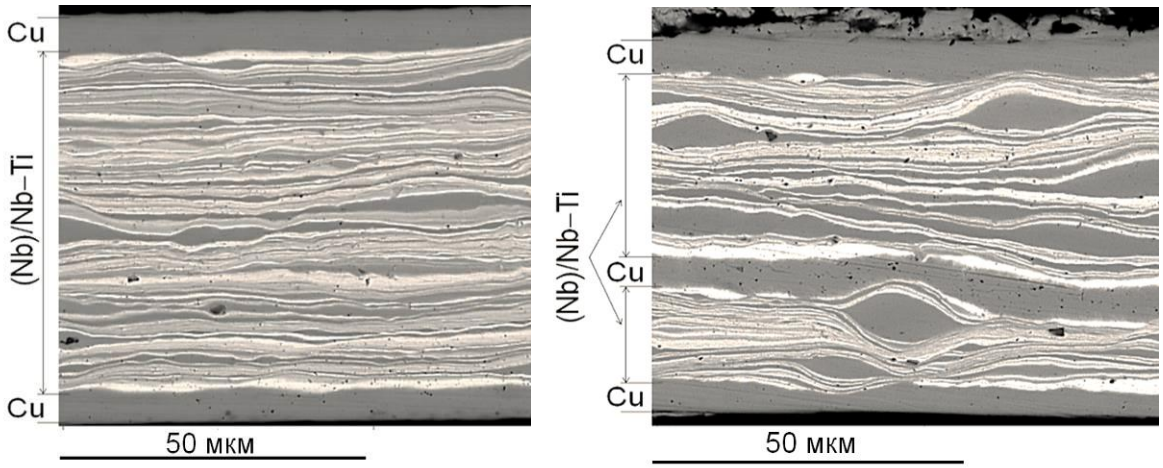
Концентрационные профили ниобия и титана свидетельствовали, что в объеме (Nb)/Nb–Ti слои из чистого титана отсутствуют. Наибольшее содержание титана, ~70 мас.%, было в дискообразных структурных образованиях (спектры 4, 5, 6 и 7, см. рис. 6, *б*). Другие участки слоев сплава Nb–Ti выглядят светло-серыми по контрасту. Это есть доказательство того, что содержание ниобия в них больше, чем в спектрах 4–7. И, действительно, спектры 13 и 14 показывают ~50 мас.%Nb и ~50 мас.%Ti.

В слоях светлого контраста, идентифицированных как Nb-твердый раствор, концентрация титана в лучшем случае не превышала 20, а часто оставалась на уровне нескольких мас.%. Резюмируя вышесказанное, можно констатировать, что твердофазное взаимодействие между ниобием и титаном происходит, в основном, за счет диффузии ниобия в титановые слои.

Измерение критического тока. Низкотемпературные измерения проводились на образцах ленты, полученных прокаткой композитов, приведенных на Рис. 7. Их микроструктура после прокатки показана на

Received: 21.05.2019 Revised: 29.06.2019 Accepted: 15.07.2019
Поступила: 21.05.2019 Одобрена: 29.06.2019 Принята: 15.07.2019

рис. 8. В отличие от структуры композита до прокатки, слоистая структура представляется состоящей из непрерывающихся слоев NbTi-сплава и твердого раствора (Nb) соответственно серого и светлого контрастов.



а *б*

Рис. 8. Микроструктура поперечного сечения многослойной сверхпроводящей ленты на основе сплава Nb–Ti с двумя (*а*) и тремя (*б*) стабилизирующими медными слоями

Образцами для измерения критического тока I_c служили отрезки многослойной ленты после 2-го цикла ДС и ПП толщиной 0,1 мм и шириной 1 мм. Измерения проводились в криостате с жидким гелием в магнитном поле H, создаваемом сверхпроводящим соленоидом, при перпендикулярной H ⊥ (ab) и параллельной H || (ab) ориентациях направления магнитного поля H и плоскости прокатки ленты (ab) (рис. 9). Транспортный ток I через образец в обоих случаях был перпендикулярен магнитному полю соленоида: I ⊥ H.

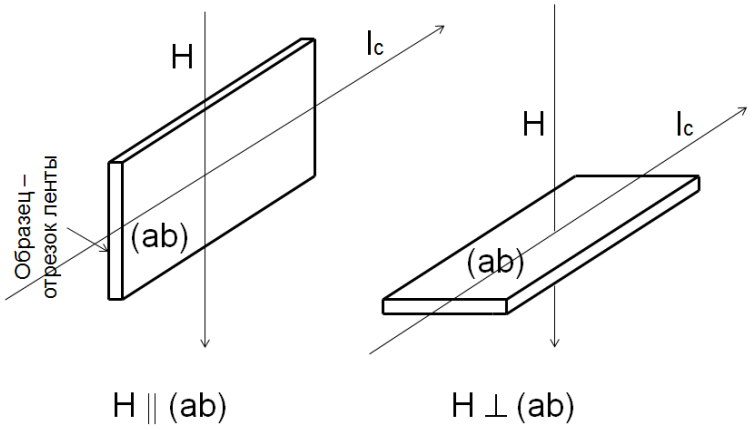
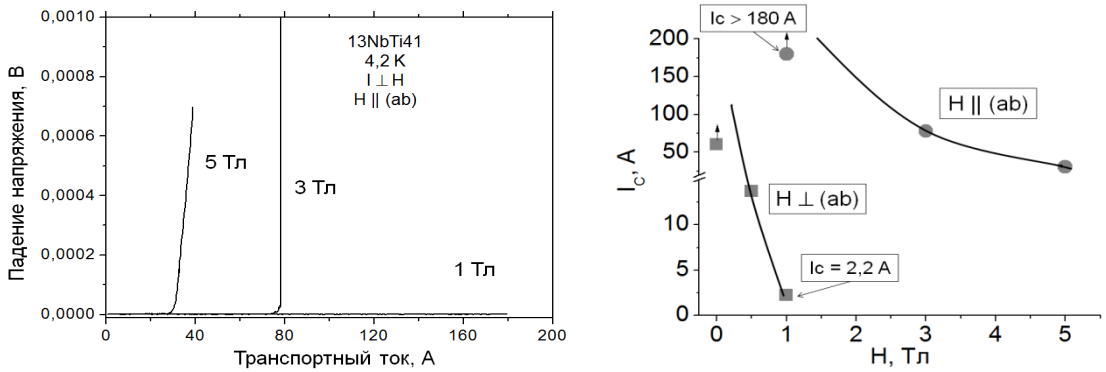


Рис. 9. Две ориентации образца относительно поля H сверхпроводящего соленоида

На Рис. 10 представлены вольт-амперные характеристики многослойной ленты в полях 1, 3 и 5 Тл и H || (ab) и зависимости

Received: 21.05.2019 Revised: 29.06.2019 Accepted: 15.07.2019
Поступила: 21.05.2019 Одобрена: 29.06.2019 Принята: 15.07.2019

критического тока I_c от магнитного поля H при H || (ab) и H ⊥ (ab). Две экспериментальные точки со “стрелками вверх” указывают на то, что транспортный ток такой силы не разрушил сверхпроводящее состояние образца.



а *б*

Рис. 10. Вольт-амперные характеристики многослойной сверхпроводящей ленты из сплава Nb–Ti при H || (ab) и H = 1, 2 и 3 Тл (*а*) и зависимости I_c(H) при H || (ab) и H ⊥ (ab) (*б*)

При H ⊥ (ab) I_c резко падал с увеличением поля уже в диапазоне от 0 до 1 Тл (см. Рис. 10 *б*). В то время как при ориентации H || (ab) он плавно понижался, оставаясь при 5 Тл на уровне ~30 А, что соответствует инженерной (конструктивной) критической плотности тока, равной $3 \cdot 10^4$ А/см^2. Анизотропия I_c, равная отношению $I_{c||}/I_{c\perp}$, рассчитанная для H = 1 Тл, была >82. Это свидетельствует о закреплении сверхпроводящих вихрей, локализующихся в сплаве Nb–Ti, на границах между несверхпроводящими слоями Nb-твердого раствора (Nb) и сплава Nb–Ti, несущего сверхпроводящий ток.

Важно отметить, что такие значения плотности тока достигались в лентах без длительных, порядка 300–350 часов, низкотемпературных отжигов при 300–350°C. Такие отжиги требуется проводить для широко используемых многожильных и многослойных сверхпроводящих материалов (Nb–Ti)/Cu. Это делается для выпадения частиц α-фазы, на которых, в отличие от рассмотренных в работе композитов, происходит закрепление сверхпроводящих вихрей.

Заключение и выводы

1. На основании проведенного РС-анализа можно сделать заключение, что в многослойном композите Nb/Ti в результате твердофазного взаимодействия между фольгами ниобия и титана в процессе диффузионной сварки за два цикла, состоящих из диффузионной

Received: 21.05.2019 Revised: 29.06.2019 Accepted: 15.07.2019
Поступила: 21.05.2019 Одобрена: 29.06.2019 Принята: 15.07.2019

сварки и пакетной прокатки, получены слои сверхпроводящего (Nb–Ti)-сплава состава Nb50Ti.

2. Слои сплава Nb50Ti, имея наиболее высокое второе критическое магнитное поле, способны проводить большой электрический ток в магнитных полях 5 и более Тесла. Прослойки Nb-твердого раствора с содержанием титана до 5–10 мас.% переходят в нормальное состояние уже в малых магнитных полях и создают границы (Nb)-NbTi, являющиеся эффективными центрами закрепления сверхпроводящих вихрей. Это подтверждается большой анизотропией критического тока: $I_{c||}/I_{c\perp} > 82$ в магнитном поле 1 Тл.

3. В многожильных сверхпроводниках из (Nb–Ti)-сплава промышленного изготовления центрами закрепления являются частицы α-фазы, выделяющиеся при длительном низкотемпературном отжиге уже готовых изделий. В композитном сверхпроводящем материале Cu/Nb/NbTi твердофазного изготовления, в котором закрепление вихрей происходит на границах (Nb)-NbTi, высокая критическая плотность тока достигалась без отжига.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей или животных в качестве объектов исследований.

Библиографический список / References

1. Труды I совещания по металловедению и металлофизике сверхпроводников «Металловедение и металлофизика сверхпроводников» / под ред. Е.М. Савицкого, В.В. Барон. – М: Наука; 1965. [Savitsky EM, Baron VV, editors. Proceedings of the I Meeting on Metallurgy and Metal Physics of Superconductors “Metallovedenie i metallofizika sverhprovodnikov”. Moscow: Nauka; 1965. (In Russ.)].
2. Savitsky EM, Baron VV, editors. Metal Science, Physical Chemistry and Metal Physics of Superconductors. Proceedings of the Second and Third Conferences. May 1965 and May 1966; Moscow, USSR. NY: Springer; 1967. doi: 10.1007/978-1-4684-8220-1
3. Труды IV Всесоюзного совещания по физико-химии, металловедению и металлофизике сверхпроводников «Физико-химия, металловедение и металлофизика сверхпроводников» / под ред. Е.М. Савицкого, В.В. Барон. – М: Наука; 1969. [Savitsky EM, Baron VV, editors. Proceedings of the Fourth All-Union Conference “Fiziko-himiya, metallovedenie i metallofizika sverhprovodnikov”. Moscow: Nauka; 1969. (In Russ.)].
4. Труды V Всесоюзного совещания по физико-химии, металловедению и металлофизике сверхпроводников «Проблемы сверхпроводящих материалов» / под ред. Е.М. Савицкого, В.В. Барон. – М: Наука; 1970. [Savitsky EM, Baron VV, editors. Proceedings of the V All-Union Conference on Physical Chemistry, Metallurgy and Metal Physics of Superconductors “Problemy sverhprovodyashchih materialov”. Moscow: Nauka; 1970. (In Russ.)].

Received: 21.05.2019 **Revised: 29.06.2019** **Accepted: 15.07.2019**
Поступила: 21.05.2019 **Одобрена: 29.06.2019** **Принята: 15.07.2019**

5. Труды VI Всесоюзного совещания по проблеме сверхпроводящих материалов «Сверхпроводящие сплавы и соединения» / под ред. Е.М. Савицкого, В.В. Барон, Л.Ф. Мызенковой. – М: Наука; 1972. [Savitsky EM, Baron VV, Myzenkova LF, editors. Proceedings of the Sixth All-Union Conference on the Problem of Superconducting Materials “Sverhprovodyashchie splavy i soedineniya”. Moscow: Nauka; 1972. (In Russ.)].
6. Структура и свойства сверхпроводящих материалов / под ред. Е.М. Савицкого, В.В. Барон, Л.Ф. Мызенковой. – М: Наука; 1974. [Savitsky EM, Baron VV, Myzenkova LF, editors. *Struktura i svojstva sverhprovodyashchih materialov*. Moscow: Nauka; 1974. (In Russ.)].
7. Физико-химия сверхпроводников / под ред. Е.М. Савицкого. – М: Наука; 1976. [Savitsky EM, editor. *Fiziko-himiya sverhprovodnikov*. Moscow: Nauka; 1976. (In Russ.)].
8. Карпов М.И., Коржов В.П., Внуков В.И., Зверев В.Н. Получение, механические и сверхпроводящие свойства наноструктурных многослойных композитов Nb/Nb–Ti // Известия высших учебных заведений. Серия: физика. – 2010. – № 3/2. – С. 144–150. [Karpov MI, Korzhov VP, Vnukov VI, Zverev VN. Poluchenie, mekhanicheskie i sverhprovodyashchie svojstva nanostrukturnyh mnogoslojnyh kompozitov Nb/Nb–Ti. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Seriya: fizika* 2010;(3/2):144-150. (In Russ.)].
9. Korzhov VP, Karpov MI, Zverev VN. Superconductivity and structure of multilayer Cu/Nb/Nb–Ti nanocomposites. *Russian Journal of General Chemistry.* 2010;80(6):1103-1108. doi: 10.1134/s1070363210060113
10. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. – М: Наука; 1982. [Shmidt VV. *Vvedenie v fiziku sverhprovodnikov*. Moscow: Nauka; 1982. (In Russ.)].
11. Карпов М.И., Коржов В.П., Внуков В.И. и др. Сверхпроводящий критический ток в наноламинате Cu–Nb // Материаловедение. – 2005. – № 2. – С. 43–47. [Karpov MI, Korzhov VP, Vnukov VI, et al. Superconducting critical current in Cu–Nb nanolaminate. *Materials Science.* 2005;(2):43-47. (In Russ.)].
12. Засуха П.Ф., Корщиков В.Д., Бухвалов О.Б., Ершов А.А. Биметаллический прокат. – М: Металлургия; 1971. [Zasucha PF, Korshchikov VD, Bukhvalov OB, Ershov AA. *Bimetallicheskij prokat*. Moscow: Metallurgia; 1971. (in Russ.)].
13. Karpov MI, Korzhov VP, Prokhorov DV, et al. Preparation, structure and high temperature properties of layered Nb/Al- and Ti/Al-composites. *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods and Technologies.* 2014;8:177-185. [cited 2019 July 6]. Available from: https://www.scientific-publications.net/get/1000002/1401699459713256.pdf
14. Баранов И.А., Бычков Ю.Ф., Коржов В.П., и др. Влияние родия на сверхпроводящие свойства циркония и некоторых его сплавов // Труды VI Всесоюзного совещания по проблеме сверхпроводящих материалов «Сверхпроводящие сплавы и соединения». – М: Наука; 1972. – С. 140–147. [Baranov IA, Bychkov Yu.F., Korzhov VP, et al. Influence of rhodium on the superconducting properties of zirconium and some of its alloys. Proceedings of the Sixth All-Union Conference on the Problem of Superconducting Materials “Superconducting alloys and compounds”. Moscow: Nauka; 1972. pp. 140-147. (In Russ.)].

Received: 21.05.2019 **Revised: 29.06.2019** **Accepted: 15.07.2019**
Поступила: 21.05.2019 **Одобрена: 29.06.2019** **Принята: 15.07.2019**

Сведения об авторах:
Коржов Валерий Поликарпович, кандидат технических наук;
адрес: 142432, Московская обл., г. Черноголовка, Институтский проспект, д. 9, кв. 99;
eLibrary SPIN: 2408-9676; Scopus ID: 7004317671;
E-mail: korzhov@issp.ac.ru

Зверев Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук;
eLibrary SPIN: 8391-3919; Scopus ID: 7101973582;
E-mail: zverev@issp.ac.ru

Information about the authors:
Valery P. Korzhov, candidate of technical sciences;
address: 142432, Moscow Region, Chernogolovka, Institutsky Prospect, 9, Apt. 99;
eLibrary SPIN: 2408-9676; Scopus ID: 7004317671;
E-mail: korzhov@issp.ac.ru

Vladimir N. Zverev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
eLibrary SPIN: 8391-3919; Scopus ID: 7101973582;
E-mail: zverev@issp.ac.ru

Цитировать:
Коржов В.П., Зверев В.Н. Многослойная сверхпроводящая лента сплава Nb50Ti, полученная из композита Cu/Nb/Ti твердофазным способом // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 2. – С. 31–46. doi: 10.17816/transsyst20195231-46

To cite this article:
Korzhov VP, Zverev VN. A multilayer superconducting tape of the Nb50Ti alloy obtained from a Cu/Nb/Ti composite with a solid phase. *Transportation Systems and Technology*. 2019;5(2):31-46. doi: 10.17816/transsyst20195231-46

Received: 21.05.2019 **Revised: 29.06.2019** **Accepted: 15.07.2019**
Поступила: 21.05.2019 **Одобрена: 29.06.2019** **Принята: 15.07.2019**