



УДК 538.945

Статья

Конструирование и производство ниобий-титановых сверхпроводников для СП-магнитов детекторов ускорительной техники

М. В. Поликарпова^{1,2,*}, В. И. Панцырный^{1,2}, С. А. Копылов², А. А. Петров², И. Н. Губкин¹, В. Ю. Корпусов¹, А. В. Мальченков¹, С. А. Шемякова¹, Ю. В. Коновалов¹, В. В. Гурьев³, А. В. Есенева⁴, Д. А. Перминов⁴, В. В. Аккузин⁴, А. А. Мартынов⁴

1 АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А. А. Бочвара», ул. Рогова, 5а, 123098, Москва, Россия

2 ООО «Росатом МеталлТех», ул. Рогова, 5а, 123098, Москва, Россия

3 НИЦ «Курчатовский институт», пл. Курчатова, 1, 123060, Москва, Россия

4 АО «Чепецкий механический завод», ул. Белова, 7, 427622, республика Удмуртия, г. Глазов, Россия

* e-mail: MViPolikarpova@rosatom.ru

Поступила в редакцию 15.10.25, после переработки 19.10.25, принята к публикации 23.10.25.

В данной статье рассмотрены общие принципы конструирования и порядок работ по изготовлению сверхпроводящих композиционных многоволоконных проводов на основе ниобий-титанового сплава в медной матрице. Электромагнитные свойства провода определяются его конструкцией, качеством исходных материалов и термомеханическим режимом изготовления. Проведены расчеты конструкции проводов для обеспечения целевых свойств двух магнитов, предназначенных для создания сверхпроводящей магнитной системы детекторов ускорителя.

Ключевые слова: ниобий-титановый сплав; сверхпроводящие волокна; коэффициент заполнения, конструктивные параметры, критический ток, коммерциализация.

DOI: 10.62539/2949-5644-2025-8-3-82-96

1. Введение

Широкое применение ниобий-титановых сверхпроводников для изготовления обмоток электромагнитных систем для ускорительной техники, энергетических установок термоядерного синтеза и лабораторных магнитов обусловлено их высокой технологичностью и приемлемой стоимостью [1, 2]. В АО «ВНИИНМ» за 50 лет разработано более 30 конструкций сверхпроводников на основе ниобий-титанового сплава различного назначения [3–5]. Под руководством ведущих специалистов АО «ВНИИНМ» разработаны основы создания технологии изготовления ниобий-титановых проводов для различных применений [6–8], проведены систематические исследования состава и структуры исходных сплавов, а также влияния режимов термомеханической обработки на структуру и сверхпроводящие свойства в широком диапазоне температур (до 7 К) и магнитных полей (до 9 Тл) [9–11].

Основным коммерческим потребителем ниобий-титановых сверхпроводников являются томографы (МРТ), которые в медицинской практике способствуют ранней и высокоточной диагностике патологий человеческого организма. Кроме сверхпроводников для МРТ, в настоящее время, требуются сверхпроводники для детекторов ускорительных комплексов.

Одним из основных направлений работ по развитию ускорительной техники является увеличение энергии пучков заряженных частиц, что достигается совершенствованием магнитной системы ускорителя. В АО «НИИЭФА» ведутся работы по созданию двух сверхпроводниковых магнитов для источников ионов [12].

Первый магнит — это магнитная система для сверхпроводникового источника ионов

с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР), на базе которого в ОИЯИ (г. Дубна) строится «Фабрика тяжелых элементов» для синтеза сверхтяжелых элементов.

Второй магнит — это сверхпроводниковая магнитная система с полем индукцией 5 Тл, являющаяся составной частью электронно-лучевого источника многозарядных ионов, который использует магнитно-сжатый квазимоноэнергетический пучок электронов с энергией до 20 кэВ и плотностью тока до 1000 А/см² для последовательной ионизации ионов с низкой зарядностью, инжектируемых в электронный пучок. Магнитное поле для сжатия электронного пучка генерируется специальной сверхпроводниковой магнитной системой, состоящей из незранированного секционного сверхпроводящего соленоида [12].

Основываясь на ранее разработанных в АО «ВНИИНМ» принципах конструирования сверхпроводников, опытные работы по изготовлению проводов для данных магнитов были проведены в АО «ЧМЗ» по техническому заданию ООО «Росатом МеталлТех», организации ответственной за коммерциализацию направления НТСП в Топливной компании «ТВЭЛ».

2. Расчет конструктивных параметров NbTi стрендов

Расчет конструктивных параметров сверхпроводника (стренда) вытекает из рабочих условий обмотки в магнитной системе — рабочего тока и индукции магнитного поля, которые определяют необходимую величину критического тока (I_c), диаметр и длину стренда, которые необходимы для создания обмотки. Технические требования заказчика к стрендам для магнитов первого и второго типа (№1 и №2) приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Номинальные значения технических характеристик стрендов №1 и №2.

| Номер стренда | №1 | №2 |
|--|-------------|------------------|
| Поперечный размер стренда без изоляции, мм | 1.2 × 1.47 | Ø 0.85 |
| Поперечный размер стренда в изоляции, мм | 1.24 × 1.51 | Ø 0.896 |
| Целевое значение I_c (4.2 К, 7.5 Тл), А | 750...900 | — |
| Целевое значение I_c (4.2 К, 5 Тл), А | — | ≥ 500 |
| Отношение медь-к-не-меди Cu/nonCu | 1.6 ± 0.2 | 1.7 ± 0.2 |
| Длина единичного куска, не менее, м | 1000 | 4000; 5000; 2300 |
| Общая длина провода, м | 11000 | 25000 |

Из Таблицы 1 видно, что площади сечений стрендов №1 и №2 сильно отличаются, так же, как и уровень критического тока, приведенный для разных значений индукции магнитного поля, поэтому для их сравнения необходимо оценить полевую зависимость плотности критического тока $J_c(B)$ от индукции магнитного поля (рис. 1), построенную по результатам работ [13, 14].

Из рис. 1 следует, что характерное соотношение $J_c(7.5 \text{ Тл})/J_c(5 \text{ Тл}) \sim 0.44$ и, при плотности тока в магнитном поле 5 Тл на уровне 3000 А/мм², целевая плотность тока в магнитном поле 7.5 Тл составит 1330 А/мм².

Учитывая, что критическая плотность тока J_c связана с величиной критического тока I_c через геометрические параметры провода: площадь сечения S и долю сверхпроводящего материала Cu/nonCu следующим образом:

$$J_c = \frac{I_c}{S} \times \left(\frac{Cu}{nonCu} + 1 \right). \quad (1)$$

Можно представить зависимости $J_c(Cu/nonCu)$ для двух стрендов графически (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что для стренда №1, в котором целевая плотность критического тока

$J_c(7.5 \text{ Тл})$ ожидается не выше 1330 А/мм^2 , необходимый для ее достижения параметр $Cu/nonCu$ должен иметь значение ≤ 1.6 . Для реализации токовых характеристик $J_c(5\text{Тл}) \geq 500 \text{ А}$ в стренде №2 возможен весь диапазон представленных значений $Cu/nonCu$. Поэтому, в данном случае, использована единая базовая конструкция финальной составной многоволоконной заготовки, при этом для стренда №2 возможны вариации объемной доли меди с гарантированным достижением токовых характеристик на уровне не менее 500 А в поле 5 Тл .

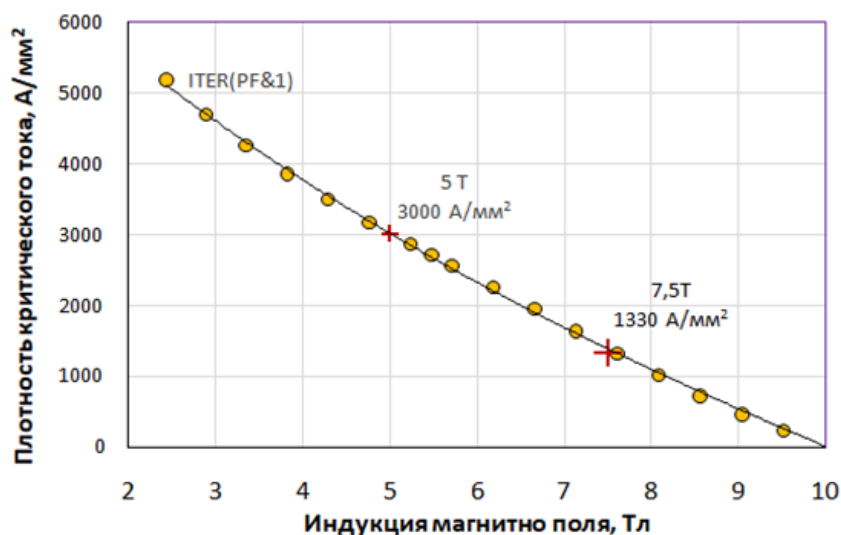


Рис. 1. Полевая зависимость плотности критического тока $J_c(B)$ для ниобий-титановых сверхпроводников ИТЭР PF&1 (рассчитано из данных [13, 14]).

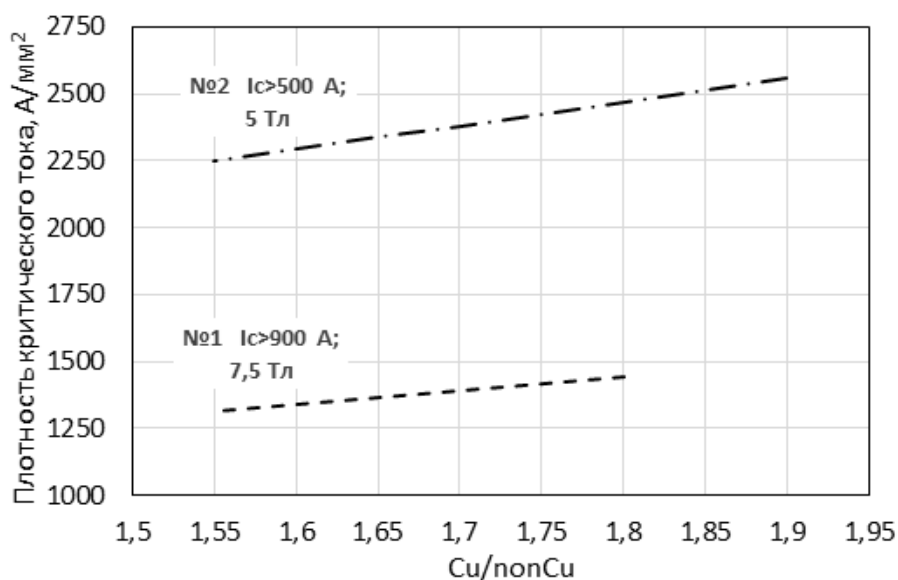


Рис. 2. Зависимость плотности критического тока J_c от объемной доли меди при целевых значениях критического тока в проводе №1 сечением $1.2 \times 1.47 \text{ мм}$ и проводе №2 диаметром $\varnothing 0.85 \text{ мм}$.

Таким образом, составные финальные заготовки №1 (рис.3) и №2, имея единую базовую конструкцию, различаются по размеру и распределению компонентов по сечению составной заготовки (Таблица 2).

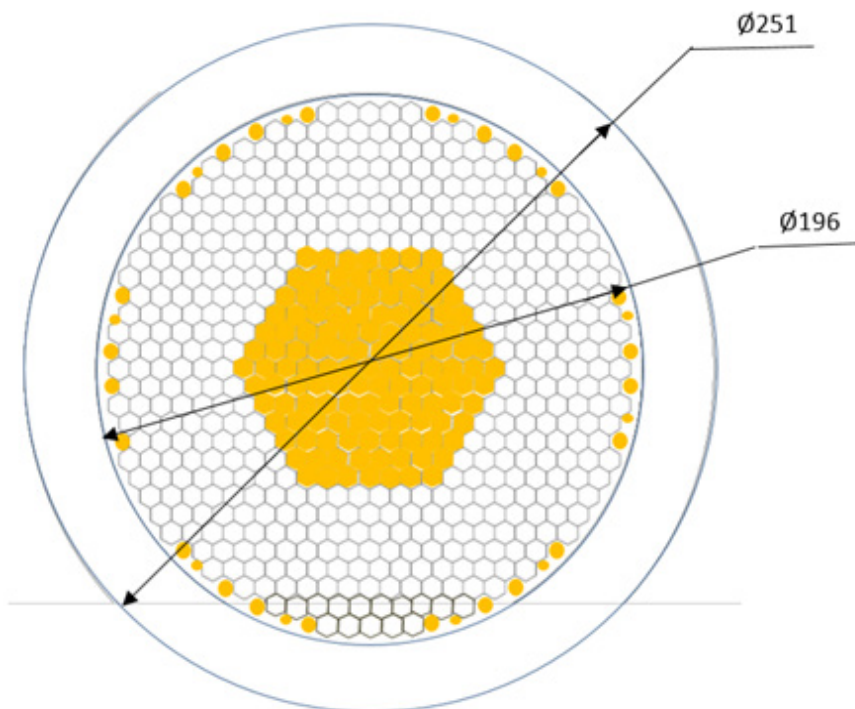


Рис. 3. Эскиз финальной составной заготовки провода №1.

Таблица 2. Параметры финальных составных заготовок №1 и №2.

| Параметр | №1 | №2 |
|---|------|-----------|
| Внешний диаметр составной заготовки, мм | 251 | 148 |
| Внутренний диаметр оболочки, мм | 196 | 122 |
| Размер ключа Cu/CuNb шестигранного элемента, S , мм | 7.55 | 4.5 |
| $Cu/nonCu$ | 1.6 | 1.5...1.9 |
| $KЗ = 1/(Cu/nonCu+1) \times 100$, % | 38 | 40...34 |
| Объемная доля меди в оболочке, % | 31 | 30 |
| Объемная доля меди в центре, % | 15 | 14...20 |
| Доля меди в волоконной зоне | 16 | 16 |
| Вытяжка при прессовании прутка, μ | 12.8 | 11.9 |

3. Изготовление шестигранных триметаллических Cu/Nb/NbTi прутков

Шестигранные триметаллические прутки были изготовлены методом сборки-прессование-деформация составных заготовок, собранных из механически обработанных ниобий-титановых стержней состава HT47 производства фирмы Wan Chang (TWC), обернутых барьерами из листового ниобия марки НББ ТУ 001.395-2006, и размещенных в чехлах из меди марки М006 по ГОСТ 859-2014. Составные заготовки подвергались прессованию в пруток диаметром 36 мм и деформации методом волочения с разовым обжатием от 10% до 20% с переходом на шестигранное сечение двух типоразмеров с размером «под ключ» — $S = 7.55$ мм и $S = 4.5$ мм для стрендов №1 и №2 соответственно. Поперечное сечение шестигранного триметаллического прутка для стренда №2 представлено на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что площадь нахлеста составляет не более 0.4% от площади ниобиевого листового барьера, следовательно, его влияние на коэффициент заполнения по ниобий-титановому сплаву и критический ток — в пределах погрешности определения.



Рис. 4. Сечение триметаллического Cu/Nb/NbTi прутка размером под ключ S4.5 мм от переднего конца прутка. На вставке представлено место нахлеста листового ниобиевого барьера.

4. Получение финальных композиционных прутков двух типоразмеров

Финальные составные многоволоконные заготовки \varnothing 251 мм и \varnothing 148 мм собраны из полученных шестигранных элементов двух типоразмеров (Таблица 2). Финальная составная заготовка №1 собрана в горизонтальном положении, а №1 — в вертикальном (рис. 5).

После дегазации всех компонентов, приварки крышек и вакуумирования финальные составные заготовки подвергались экструзии на горизонтальном (заготовка №1) и вертикальном (заготовка №2) гидравлических прессах с максимальным усилием прессования 2900 тс и 1000 тс соответственно.

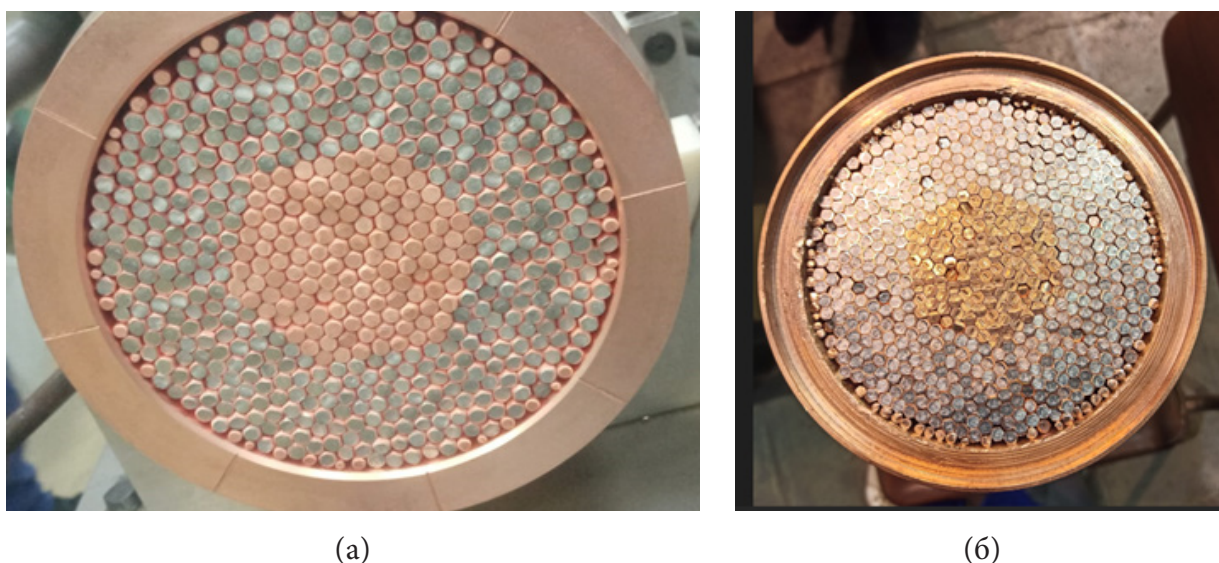


Рис. 5. Общий вид составных заготовок №1 — $D_{\text{внеш}} = 250$ мм (а) и №2 — $D_{\text{внеш}} = 148$ мм (б) без крышек. Вес заготовок 287 кг и 57 кг соответственно.

Полученные прутки №1 и №2 диаметрами $\varnothing 70$ мм и $\varnothing 45$ мм соответственно, после отрезки дефектных концов с неустоявшейся геометрией (рис. 6) подвергались деформации волочением с промежуточными термообработками, в результате которых происходит диффузионный распад ниобий-титанового сплава с выделением частиц альфа-титана, которые обеспечивают токонесущую способность стренда в магнитных полях.



Рис. 6. Продольные шлифы переднего (верхний) и заднего (нижний) концов прутка №1 с неустоявшейся геометрией.

5. Расчет термомеханического режима обработки финальных прутков

Расчет режима термомеханической обработки (ТМО) проводили, исходя из деформационного пространства, доступного для стрендов разных типоразмеров и целевых значений плотности критического тока. На рис. 7 представлена эмпирическая зависимость плотности критического тока в магнитном поле 5 Тл от вытяжки финального прутка (для случая оптимальной ТМО), полученная на основании многолетнего опыта АО «ВНИИНМ».

Выбор ТМО предполагает проведение первого отжига после деформации прутка с вытяжкой μ порядка 5.5–6, а последующие 3 или 4 промежуточных отжига через примерно равные промежутки ($\mu \sim 1.8$ –3). Отжиги необходимы для образования выделений альфа титана из твердого раствора Nb-Ti, а вытяжки — для их распределения. Важным моментом является оптимальная вытяжка после последней ТО, величина которой определяет структуру ниобий-титановых волокон, распределение и размер наночастиц альфа-титана.

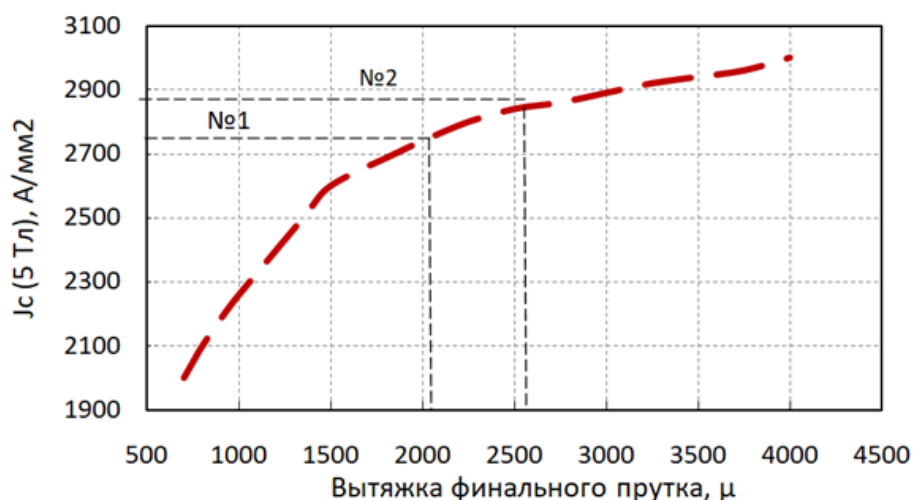


Рис. 7. Зависимость плотности критического тока $J_c(5 \text{ Тл})$ от вытяжки финального прутка при условии оптимального распределения ТО по деформационному пространству.

В Таблице 3 приведены вытяжки финальных обточенных прутков №1 и №2, диаметрами $D_{об}$ \varnothing 66 мм и \varnothing 43 мм соответственно, а также вытяжки прутков после последней ТО.

Таблица 3. Параметры деформации финальных прутков.

| Параметр | №1 | №2 |
|--|------|------|
| Диаметр стренда, d , мм (для 1.2×1.47 мм — эквивалентный) | 1.5 | 0.85 |
| Суммарная вытяжка финального прутка, $D_{об2}/d2$ | 2055 | 2560 |
| Вытяжка после последней ТО, $D_{ма}^2/d^2$ | 63 | 74 |

Из данных Таблицы 3 и графика рис. 7 следует, что при оптимальном режиме ТМО, следует ожидать плотность тока в стренде №1 на уровне 2700 А/мм^2 , а в стренде №2 — близко к 2900 А/мм^2 .

В результате деформации волочением финальных прутков с промежуточными термообработками, распределенными по деформационному пространству, были получены стренды №1 размером 1.2×1.47 мм двумя кусками длиной 4 и 7 км и стренд №2 круглого сечения \varnothing 0.85 мм в шести кусках длиной от 2 до 7 км. Поперечное сечение стрендов №1 и №2 представлено на рис. 8.

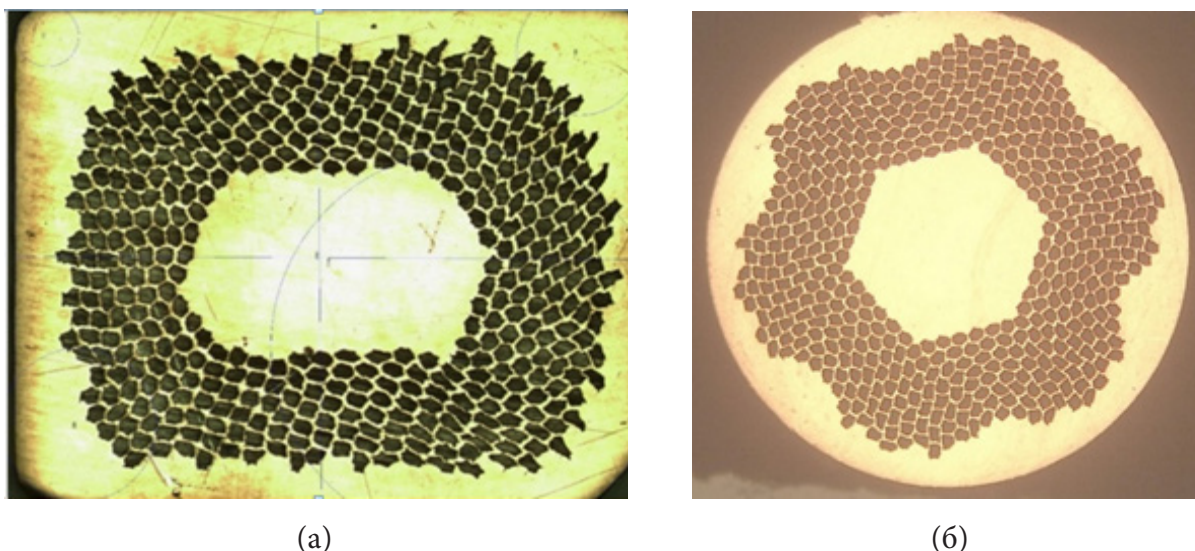


Рис. 8. Поперечные сечения стрендов 1.2×1.47 мм — №1 (а) и \varnothing 0.85 мм — №2 (б). Диаметр NbTi волокон составлял 45 мкм (стренд №1) и 25 мкм (стренд №2).

6. Нанесение изоляции

Для создания защитного влагостойкого покрытия стренд №2 круглого сечения \varnothing 0.85 мм был подвергнут эмалированию. Поскольку эмалирование проводов профильного сечения задача очень непростая, для стренда №1 был использован метод обмотки полиамидно-фторопластовой пленкой, которая представляет собой комбинированный материал на основе полиамидной пленки с односторонним фторопластовым покрытием, толщиной порядка 80 мкм.

Пробивное напряжение изоляции провода №1, измеренное по ГОСТ 2990, составило более 1000 В, а механические свойства изолированного провода: $\sigma_g = 500 \text{ МПа}$, удлинение $\delta = 6\%$, что вполне достаточно для успешной намотки провода в магнитной системе.

7. Электромагнитные испытания

Криогенные электромагнитные испытания образцов от штатных кусков №1 и №2, а также экспериментальных образцов разного диаметра, полученных путем волочения отрезка

прутка №1 (образцы 3а и 3б), проводились на испытательном стенде в НИЦ «Курчатовский институт» с использованием гелиевого криостата с соленоидом на 13 Тл. Результаты определения плотности критического тока по формуле 1 (с учетом значения $Cu/nonCu$) приведены в Таблице 4 и на рис. 9. Погрешность определения J_c (с учетом погрешности $Cu/nonCu$) составляет не более 3%.

Таблица 4. Токовые характеристики штатных и экспериментальных образцов.

| № образца | Размер поперечного сечения, мм | Критический ток, I_c (5 Тл), А | $Cu/nonCu$ | Плотность критического тока J_c (5 Тл), А/мм ² |
|-----------|--------------------------------|----------------------------------|------------|---|
| 1-1 | 1.2×1.47 | 1777 | 1.54 | 2638 |
| 1-2 | 1.2×1.47 | 1711 | 1.54 | 2540 |
| 1-3 | 1.2×1.47 | 1670 | 1.57 | 2509 |
| 3а | Ø 0.85 | 664 | 1.57 | 3009 |
| 3б | Ø 1.07 | 970 | 1.57 | 2774 |
| 2-1 | Ø 0.85 | 659 | 1.50 | 2905 |
| 2-2 | Ø 0.85 | 595 | 1.65 | 2780 |
| 2-3 | Ø 0.85 | 545 | 1.83 | 2720 |
| 2-4 | Ø 0.85 | 533 | 1.87 | 2697 |

Из Таблицы 4 и рис. 9 следует, что в целом, плотность критического тока стрендов №2 выше на 7–8%, чем стрендов №1, что коррелирует с различием в вытяжках финальных прутков ($\mu \sim 2055$ и 2560 для стрендов №1 и №2 соответственно).

Плотность критического тока экспериментальных образцов (3б и 3а), изготовленных путем волочения отрезка прутка №1 Ø 7.3 мм, также демонстрирует зависимость от суммарной вытяжки финального прутка (рис. 9).

Таким образом, полученные данные еще раз качественно подтверждают экспериментальную зависимость $J_c(\mu)$, полученную ранее в АО «ВНИИНМ» (рис. 7).

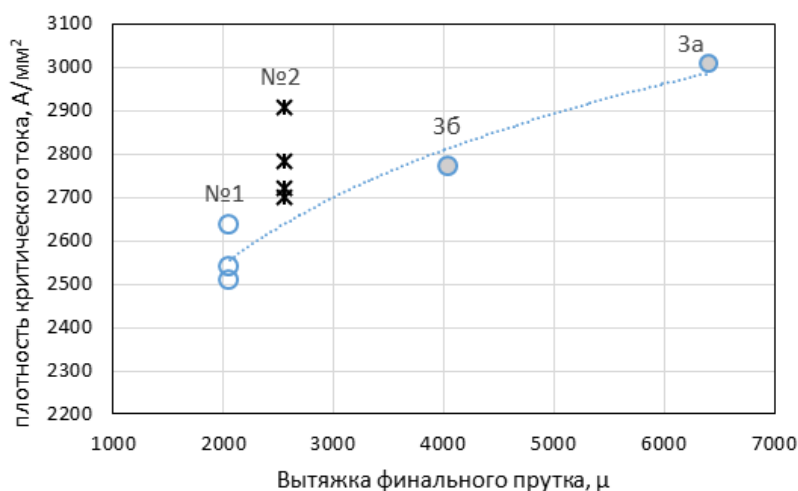


Рис. 9. Значения J_c штатных и экспериментальных стрендов в зависимости от вытяжки финального прутка.

8. Характеризация стренда №1 в широком диапазоне магнитных полей

Разработчикам магнитной системы необходимо знать критический ток во всем диапазоне магнитных полей, что важно при расчете режимов заведения и вывода тока. Электромагнит-

ные испытания стренда прямоугольного сечения (№1) были проведены в диапазоне магнитных полей от 8 до 5 Тл, и на основании экспериментальных точек рассчитана экстраполяционная зависимость $I_c(B)$ в области малых магнитных полей по принятой модели пиннинга [15]:

$$I_c(B, T) = \frac{C_0}{B} b^\alpha (1-b)^\beta (1-t^{1.7})^\gamma, \quad (2)$$

где $t = T/T_c$ и $b = B/B_{c2}(T)$ — приведенные значения магнитного поля и температуры, а T_c и $B_{c2}(T)$ — критическая температура и верхнее критическое поле ниобий-титанового сплава, C_0 , α , β , и γ — свободные параметры, зависящие от состава и структуры сверхпроводящего материала.

В Таблице 5 приведены измеренные значения критического тока (по критерию электрического поля 10^{-7} В/см) в различных полях $I_c(B)$ и показатель резистивности n , характеризующий скорость нарастания электрического поля в диапазоне 10^{-7} – 10^{-6} В/см, т. е. вблизи сверхпроводящего перехода.

Подгоночные параметры уравнения (2) определены методом регрессионного анализа, из принципа минимизации расхождения расчетных и экспериментальных значений (Таблица 6) и построена расчетная зависимость полевая зависимость критического тока $I_c(B)$ (рис. 10).

Таблица 5. Токовые характеристика стренда №1 в разных магнитных полях при температуре жидкого гелия (4.2 К).

| Поле, Тл | I_c (0.1 мкВ/см), А | n |
|----------|-----------------------|-----|
| 8 | 641 | 37 |
| 7.5 | 809 | 33 |
| 7.3 | 878 | 33 |
| 7 | 986 | 30 |
| 6.5 | 1172 | 32 |
| 6 | 1371 | 41 |
| 5.5 | 1566 | 33 |
| 5 | 1777 | 33 |

Таблица 6. Подгоночные параметры уравнения (2).

| Параметр | Значение |
|----------|-----------------|
| C_0 | 63185 ± 200 |
| B_{c2} | 13.976 |
| T_{c0} | 8.726 |
| α | 0.890 |
| β | 1.048 |
| γ | 1.824 |

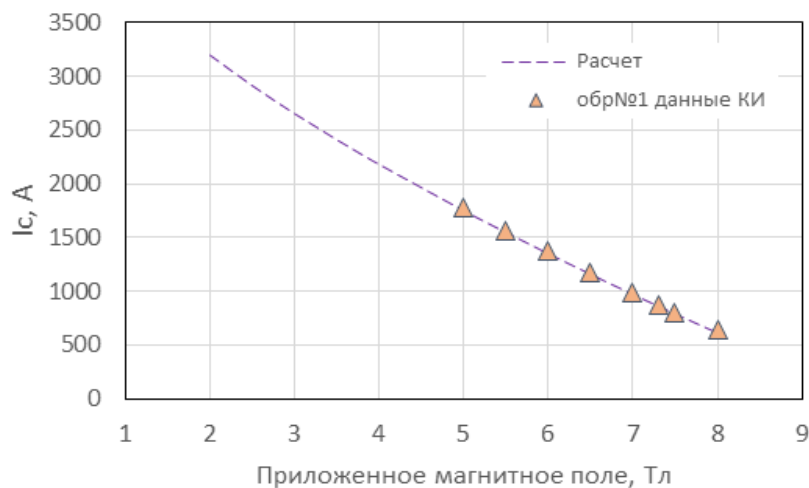


Рис. 10. Полевая зависимость критического тока $I_c(4.2\text{К}; B)$ стренда №1 сечением 1.2×1.47 мм и расчетная зависимость $I_c(B)$ по уравнению (2).

9. Заключение

В тесной кооперации между ООО «Росатом МеталлТех», АО «ВНИИНМ» и АО «ЧМЗ» разработаны конструкции ниобий-титановых сверхпроводников (стрендов) для создания магнитных систем детекторов ускорительной техники и выпущено более 36 км стрендов двух типоразмеров.

Проведены электромагнитные испытания полученных стрендов в жидком гелии. Показано, что плотность критического тока штатных стрендов первого и второго типов находится на уровне 2600 А/мм^2 и 2800 А/мм^2 , что обеспечивает их целевую токнесущую способность. В ходе разработки технологии проводов получены эмпирические зависимости $I_c(B)$ и $J_c(\mu)$.

Установлена расчетная зависимость критического тока от величины магнитного поля $I_c(B)$ для стренда прямоугольного сечения 1.2×1.47 мм в широком диапазоне магнитных полей, что дает возможность определить критический ток в низких (до 2 Тл) полях, где прямые электромагнитные испытания недоступны.

Благодарность

Авторы выражают глубокую благодарность Трефилову Тимофею Сергеевичу за сопровождение технологических операций в ООО «Росатом МеталлТех», Никуленкову Евгению Васильевичу, Карасеву Юрию Владимировичу, Салунину Николаю Ивановичу и Потаниной Людмиле Владимировне за полезные обсуждения результатов работы, а также Уткину Константину Владимировичу за сопровождение технологических операций в АО «ЧМЗ».

Литература

- [1] А.К. Шиков, В.И. Панцырный, А.Е. Воробьева, Г.П. Ведерников, С.В. Судьев, Е.А. Дергунова, Л.В. Потанина, Э.И. Плашкин, Н.А. Беляков, В.В. Сергеев, Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы **67**, 303 (2006).
- [2] Е.А. Дергунова, Л.В. Потанина, И.Н. Губкин, Основы материаловедения NbTi сверхпроводников. Применение сверхпроводников. Учебное пособие. М.: МИФИ, 2009.
- [3] N.I. Salunin, E.I. Plashkin, E.V. Nikulenkov, Ya.V. Filkin, A.D. Nikulin, G.K. Zelenskiy, G.P. Vedernikov, V.A. Drobishev, L.V. Potanina, B.V. Yakovlev, IEEE Transactions on Magnetics **32**, 2902 (1996). DOI: 10.1109/20.511482.
- [4] G.P. Vedernikov, A.K. Shikov, L.V. Potanina, E.I. Plashkin, E.V. Nikulenkov, I.N. Gubkin, N.I. Salunin, V.Yu Korpusov, Physica C: Superconductivity and its Applications **354**, 420 (2001).

- [5] И.Н. Губкин, В.В. Зубко, Ю.В. Карасёв, В.Ю. Корпусов, Л.В. Потанина, Н.И. Салунин, Кабели и провода **384**, 3 (2020).
- [6] И.Н. Губкин. Разработка режимов термомеханической обработки, обеспечивающей повышение токонесущей способности многоволоконных проводов однократной сборки на основе сплава НТ-50 с диаметром волокон 10-100 мкм: дис. канд. техн. наук: 05.16.01 / И.Н. Губкин. М.: 1988.
- [7] Л.В. Потанина. Исследование качества двойных NbTiTa сплавов и разработка сверхпроводников на их основе для различных технических применений: дис. канд. техн. наук / Л.В. Потанина. М.: 2006.
- [8] Ю.В. Карасев. Разработка и исследование NbTi сверхпроводников с низкими потерями для быстроциклирующих магнитов ускорительной техники: дис. канд. техн. наук / Ю.В. Карасев. М.: 2021.
- [9] A.K. Shikov, V.I. Pantsyrny, N.I. Kozlenkova, L.V. Potanina, R.M. Vasilyev, I.N. Gubkin, E.V. Nikulenkov, J. Emhofer, M. Eisterer, H.W. Weber, IEEE Trans. Appl. Supercond. **19**, 2540 (2009). DOI: 10.1109/TASC.2009.2019134
- [10] Yu.V. Karasev, V.I. Pantsyrny, M.V. Polikarpova, P.A. Lukianov, L.V. Potanina, T. Baumgartner, M. Eisterer, H.W. Weber, IEEE Trans. Appl. Supercond. **23**, 6001304 (2013).
- [11] Yu. Karasev, A. Malchenkov, P. Lukyanov, M. Polikarpova, V.I. Pantsyrny, I. Abdyukhanov, Yu. Konovalov, L. Potanina, S. Lelechov, T. Baumgartner, M. Eisterer, H.W. Weber, IEEE Trans. Appl. Supercond. **26**, 6000104 (2016).
- [12] E.R. Zapretalina, Yu.A. Klimchenko, O.A. Kovalchuk, A.N. Labusov, E.A. Lamzin, I.Yu. Rodin, V.N. Tanchuk, N.A. Khitrov, T.A. Khon, Instruments and Experimental Techniques. **67**, 260 (2024). DOI:10.1134/S0020441224701781.
- [13] Yu.V. Karasev, V.I. Pantsyrny, M.V. Polikarpova, P.A. Lukianov, L.V. Potanina, T. Baumgartner, M. Eisterer, H.W. Weber, IEEE Trans. Appl. Supercond. **23**, 6461927 (2013).
- [14] N. Salunin, N. Kozlenkova, M. Polikarpova, L. Potanina, D. Novosiliva, A. Vorobiova, Y. Karasev, I. Gubkin, IEEE Trans. Appl. Supercond. **22**, 4804604 (2012).
- [15] L. Bottura, IEEE Trans. Appl. Supercond. **10**, 1054 (2000). DOI: 10.1109/77.828413

Design and production of niobium-titanium superconductors for superconducting magnets of accelerator detectors

M. V. Polikarpova^{1,2,*}, V. I. Pantsyrnyi^{1,2}, S.A. Kopylov², A.A. Petrov², I. N. Gubkin¹, V. Yu. Korpusev¹, A. V. Malchenkov¹, S. A. Shevyakova¹, Yu. V. Konovalov¹, V. V. Guryev³, A. V. Eseneev⁴, D. A. Perminov⁴, V.V. Akkuzin⁴, A.A. Martynov⁴

1 JSC VNIINM, Rogova, 5a, 123098 Moscow, Russia

2 Rusatom Metalltech, Rogova, 5a, 123098, Moscow, Russia

3 Research Center “Kurchatov Institute”, Kurchatov Sq, 1, 123060, Moscow, Russia

4 JSC ChMP, Belova, 7, 427622, Glazov, Russia

* e-mail: MVPolikarpova@bochvar.ru

The general design principles and manufacturing process for superconducting composite multifilament wires based on a niobium-titanium alloy in a copper matrix are discussed in this article. The electromagnetic properties of the wire are determined by its design, the quality of the raw materials, and the thermomechanical manufacturing conditions. Design calculations for the wires are performed to ensure the target properties of two magnets intended for the creation of a superconducting magnetic system for the accelerator detectors.

Keywords: Niobium-titanium alloy; superconducting filaments; filling factor; design parameters, critical current; commercialization.



Мария Викторовна Поликарпова — к. т. н., старший научный сотрудник АО «ВНИИИМ», ведущий инженер ООО «Росатом МеталлТех»

Ph. D. Maria V. Polikarpova — Senior research fellow of JSC VNIINM, Lead Engineer of “Rusatom MetallTech”



Виктор Иванович Панцырный — д. т. н., главный научный сотрудник АО «ВНИИИМ», директор по направлению «Проводниковая продукция» ООО «Росатом МеталлТех».

Dr. Victor I. Pantsyrnyi — Chief researcher of JSC VNIINM, director of the Conductor Products Department of “Rusatom MetallTech”.



Сергей Александрович Копылов — Руководитель технического направления ООО «Росатом МеталлТех».

Sergey A. Kopylov — Head of Technical Department of “Rusatom MetallTech”.



Арте́м Алексе́евич Петро́в — к. т. н., руководитель научно-технического направления ООО «Росатом МеталлТех».

Artem A. Petrov — Ph. D., head of scientific and technical department of “Rusatom MetallTech”.



Влади́мир Ю́рьевич Корпу́сов — старший научный сотрудник, АО «ВНИИНМ».

Vladimir V. Korpusov — Senior research fellow of JSC VNIINM.



Иго́рь Никола́евич Губки́н — ведущий научный сотрудник, АО «ВНИИНМ».

Artem A. Petrov – Lead research fellow of JSC VNIINM



Анто́н Вале́рьевич Ма́льченко́в — старший научный сотрудник, АО «ВНИИНМ».

Anton V. Malchenkov — Senior research fellow of JSC VNIINM.



Ю́рий Вале́нтинович Коно́валов — ведущий научный сотрудник, АО «ВНИИНМ».

Anton V. Malchenkov — Lead research fellow of JSC VNIINM.



Светлана Андреевна Шевякова — научный сотрудник АО «ВНИИНМ».

Svetlana A. Shevyakova — research fellow of JSC VNIINM.



Валентин Васильевич Гурьев — старший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт».

Valentin V. Guryev — Senior Researcher, National Research Center “Kurchatov Institute”.



Андрей Владимирович Есеев — руководитель проекта по сверхпроводящим материалам АО «ЧМЗ».

Andrei V. Eseneev — Project Manager for Superconducting Materials at JSC ChMP.



Дмитрий Анатольевич Перминов — ведущий специалист по производству сверхпроводящих материалов АО «ЧМЗ».

Dmitryi A. Perminov — leading specialist in the production of superconducting materials of JSC ChMZ.



Владимир Владимирович Аккузин — инженер-технолог 2 категории, АО «ЧМЗ».

Vladimir V. Akkuzin — 2nd category process engineer of JSC ChMZ.



Андрей Алексеевич Мартынов — начальник цеха №87, АО «ЧМЗ».

Andrey A. Martynov — Head of section #87 of JSC ChMZ.