



DOI 10.52350/2072215X\_2023\_2\_11

# ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ РЕЗЕРФОРДОВСКОГО КАБЕЛЯ ДЛЯ ДЕТЕКТОРА PANDA УСТАНОВКИ FAIR

## DESIGN OPTIMIZATION OF THE RUTHERFORD CABLE FOR THE PANDA DETECTOR OF THE FAIR FACILITY

**L.V. Potanina**, *Cand. Sc. (Engineering), Leading Research Scientist, JSC VNIIEP;*

**K.S. Marinin**, *Head of Sector, JSC VNIIEP;*

**A.A. Nosov**, *Cand. Sc. (Engineering), Senior Research Scientist, JSC VNIIEP;*

**D.S. Kaverin**, *Cand. Sc. (Engineering), Senior Research Scientist, JSC VNIIEP;*

**S.S. Fetisov**, *Dr. Sc. (Engineering), Division Manager, JSC VNIIEP;*

**V.S. Vysotsky**, *Dr. Sc. (Engineering), Deputy Division Manager, JSC VNIIEP;*

**E.E. Pyata**, *Senior Research Scientist, Head of Technology Group, Institute of Nuclear Physics of the Russian Academy of Sciences;*

**Yu.V. Karasev**, *Cand. Sc. (Engineering), Chief Expert, AO VNIINM;*

**A.V. Malchenkov**, *Senior Research Scientist, AO VNIINM;*

**S.V. Shavkin**, *Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Head of Department, National Research Centre "Kurchatov Institute";*

**V.V. Guryev**, *Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Senior Research Scientist, National Research Centre "Kurchatov Institute"*

**Л.В. Потанина**, *канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ОАО «ВНИИЭП»;*

**К.С. Маринин**, *заведующий сектором, ОАО «ВНИИЭП»;*

**А.А. Носов**, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ОАО «ВНИИЭП»;*

**Д.С. Каверин**, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ОАО «ВНИИЭП»;*

**С.С. Фетисов**, *д-р техн. наук, заведующий отделением, ОАО «ВНИИЭП»;*

**В.С. Высоцкий**, *д-р техн. наук, заместитель заведующего отделением, ОАО «ВНИИЭП»;*

**Е.Э. Пята**, *старший научный сотрудник, руководитель технологической группы, ИЯФ СО РАН;*

**Ю.В. Карасёв**, *канд. техн. наук, главный эксперт, АО «ВНИИИМ»;*

**А.В. Мальченков**, *старший научный сотрудник, АО «ВНИИИМ»;*

**С.В. Шавкин**, *канд. физ.-мат. наук, начальник отдела, НИЦ «Курчатовский институт»;*

**В.В. Гурьев**, *канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт»*

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований по оптимизации конструкции 8-жильного резерфордовского кабеля для высокостабилизированного прямоугольного проводника магнита-детектора PANDA установки FAIR, направленных на сохранение токонесущей способности и других электрофизических характеристик многоволоконного сверхпроводящего NbTi/Cu провода диаметром 1,4 мм в процессе изготовления кабеля. Обнаружено, что используемый провод не выдерживает деформации при изготовлении резерфордовского кабеля с первоначально заданными параметрами, и, следовательно, конструкция кабеля должна быть доработана. Оптимизация конструкции проведена за счёт уменьшения угла транспонирования и увеличения ширины кабеля, что позволило существенно уменьшить деформацию в местах изгиба провода на боковых гранях кабеля. В проводах, выплетенных из кабелей оптимизированной конструкции, деградация критического тока не превышает 5 %, а показатель резистивного перехода  $n$ , характеризующий качество сверхпроводящих волокон, остаётся на уровне исходного провода. Увеличение ширины кабеля с 5,3 до 6,1–6,3 мм, приводящее при компактировании к снижению обжатия по ширине с 24 до ~ 10 %, способствует повышению RRR выплетенных проводов с 64 до 80–82 единиц.

**Ключевые слова:** сверхпроводящие кабели, ниобий-титан, резерфордовский кабель, оптимизация конструкции

**Abstract.** This paper presents the results of design optimization of the 8-strand Rutherford cable for a highly stabilized conductor for the PANDA magnet-detector of the FAIR facility, aimed at maintaining the current-carrying capacity and other characteristics of the initial multifilament superconducting 1.4 mm NbTi/Cu wire during the cable manufacturing process. It is found that the wire used does not withstand deformation during the manufacture of the Rutherford cable with the initially specified parameters, and, therefore, the cable design must be improved. The design was optimized by reducing the transposition angle and increasing the cable width, which made it possible to significantly reduce the deformation in the edge strands. In strands taken from the cables of an optimized design, the degradation of the critical current does not exceed 5 %, and the resistive transition index  $n$ , which characterizes the quality of superconducting filaments, remains at the level of the initial wire. Widening of the cable width, which leads to a reduction in deformation during cable compaction from 24 to  $\sim 10$  %, results in the strands RRR increase from 64 to 80–82.

**Key words:** superconducting cables, niobium-titanium, Rutherford cable, design optimization

Материал поступил в редакцию 30.03.2023  
 Автор, ответственный за переписку: Потанина Л.В.  
 E-mail: potaninal@mail.ru

## Введение

Эксперимент PANDA на Установке для исследования антипротонов и ионов (FAIR) в Дармштадте, (Германия) будет использовать аннигиляцию протон-антипротон для изучения физики сильного взаимодействия. Для достижения требуемого разрешения детектор установки будет содержать два магнитных спектрометра: Target и Forward. Токонесущим элементом магнита Target является высокостабилизированный проводник размером  $10,9 \times 7,93$  мм (рис. 1), представляющий собой 8-жильный резерфордовский кабель на основе многоволоконного сверхпроводящего (СП) NbTi провода диаметром 1,4 мм, окружённый матрицей из высокочистого алюминия [1].

Резерфордовский кабель представляет собой тип сверхпроводящего токонесущего элемента, в котором СП провода скомпонованы в виде многопроводочной спирали, сплюсненной в прямоугольный профиль [2].

Разработка конструкции кабеля проводится в несколько итераций. Количество СП проводов в кабеле, их диаметр, толщина и ширина кабеля выбираются исходя из рабочего тока магнита, режима работы магнитного поля, занимаемого обмоткой пространства, требуемой стабильности (температурный запас, запас по току) и других параметров магнита. Шаг и угол транспонирования проводов в кабеле рассчитывают исходя из обеспечения наименьших кабельных потерь.

Основной проблемой при изготовлении резерфордовского кабеля является повышенная деформация проводов при изгибе на боковых гранях кабеля, что приводит к деградации токонесущей способности

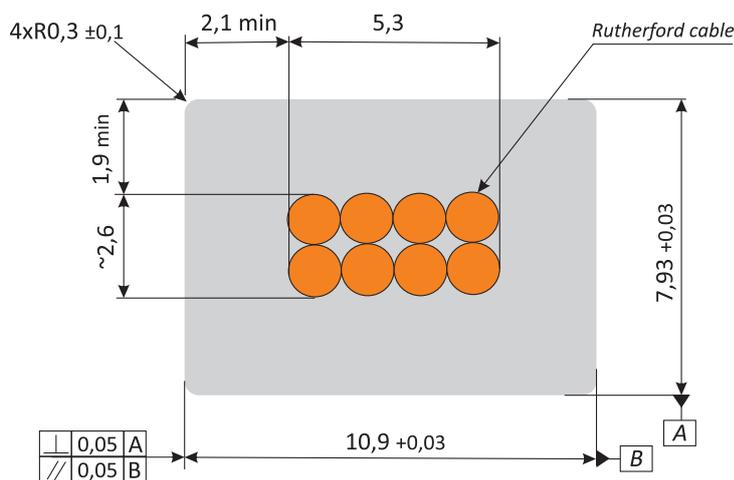


Рис. 1. Высокостабилизированный сверхпроводящий проводник для магнита Target детектора PANDA

и снижению стабильности. Деградация этих характеристик связана с искажением геометрии поперечного сечения проводов и разрушением их отдельных компонентов, имеющих большое различие в механических свойствах. Поэтому при разработке и изготовлении кабелей должны быть приняты меры по снижению деформации проводов на боковых гранях.

Вместе с тем, для придания требуемых механических свойств, кабели должны быть должным образом уплотнены. Коэффициенты уплотнения кабеля определяются по формулам [3]:

– по толщине

$$C_t = \frac{t}{2d} - 1 \quad (1)$$



– по ширине

$$C_w = \frac{w}{\left(\frac{N}{2} \cdot \cos A + 0,732\right) \cdot d} - 1 \quad (2)$$

– общее уплотнение кабеля

$$C_{tot} = (1 + C_w) \cdot (1 + C_t) \quad (3)$$

где  $t$  – толщина кабеля;  
 $w$  – ширина кабеля;  
 $d$  – диаметр провода;  
 $N$  – число проводов в кабеле;  
 $A$  – угол транспонирования.

Оптимизация баланса между ограничением деформации проводов и желаемым уплотнением кабеля достигается эмпирически – путём изготовления и испытания прототипов создаваемого кабеля на основе конкретного провода.

**1 Предварительные технические требования к проводу и кабелю для магнита-детектора PANDA**

Согласно спецификации на резерфордовский кабель для проводника магнита Target детектора PANDA [1], исходный провод должен иметь диаметр  $1,400 \pm 0,005$  мм, относительное остаточное электросопротивление (RRR)  $> 100$ , плотность критического тока (4,2 К; 5 Тл)  $> 2800$  А/мм<sup>2</sup>, критический ток (4,2 К; 5 Тл)  $> 2160$  А и параметр нарастания тока  $n$  (4,2 К; 5 Тл)  $> 30$ , а кабель должен содержать 8 таких проводов. Габариты кабеля должны составлять  $(5,3 \pm 0,1) \times (2,60 \pm 0,05)$  мм, угол транспонирования –  $20,0 \pm 0,5$  град., направление скрутки – правое. При этом деградация критического тока в выплетенном из кабеля проводе (при 4,2 К, 5 Тл) должна быть не более 5 %, а его относительное остаточное электросопротивление ( $RRR = R_{273K} / R_{10K}$ ) должно быть  $> 100$ .

**2 Провод для изготовления резерфордовского кабеля**

Для выполнения требований FAIR по критическому току  $> 2160$  А в магнитном поле 5 Тл при 4,2 К в NbTi проводе диаметром 1,4 мм отношение Cu/non Cu (отношение площади стабилизирующей

медной матрицы к площади сверхпроводящих NbTi волокон в его сечении) составляет  $\sim 1$ .

Конструктивно провода с таким отношением Cu/non Cu имеют более тонкую внешнюю медную оболочку, по сравнению с обычно применяемыми для изготовления резерфордовских кабелей проводами с отношением Cu/non Cu в интервале  $\sim 1,5-2$ .

Отношение Cu/non Cu является важной характеристикой СП проводов. Введение меди в конструкцию СП провода необходимо для отвода тока при переходе сверхпроводника в нормальное состояние и обеспечения достаточной теплоёмкости при восстановлении сверхпроводника после воздействия тепла, выделяемого возмущением. Кроме того, наличие меди в центре и на периферии сечения провода позволяет сохранить целостность волоконной зоны в процессе деформации при изготовлении кабелей и сократить деградацию сверхпроводящих характеристик.

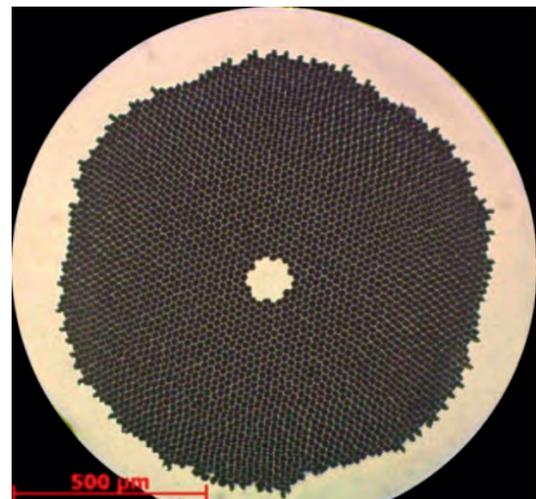


Рис. 2. Поперечное сечение сверхпроводящего NbTi провода

Уменьшение отношения Cu/non Cu вызывает серьёзное повышение механических свойств и понижает стабильность провода.

Характеристики изготовленного опытного NbTi провода для магнита Target детектора PANDA (рис. 2) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики опытного провода для магнита Target детектора PANDA

Диаметр провода, мм	Диаметр волокна, мкм	Направление/ шаг скрутки, мм	Cu/non Cu	RRR	$I_c$ (0,1 мкВ/см), А	$n$
$1,400 \pm 0,005$	19	левое/22	0,95–0,93	165–182	8 Тл: 789–750 7 Тл: 1253–1200 6 Тл: 1746	35–36 52–50 71

Измерения критического тока провода проведены в магнитных полях 6–8 Тл. При измерениях в поле 5 Тл происходил срыв тока ниже его критического значения.

Подобные проблемы, связанные со срывом тока при снижении магнитного поля, отмечаются при испытаниях проводов с высокой токнесущей способностью и относительно низкой стабилизацией.

Оценка критического тока в поле 5 Тл, проведённая путём экстраполяции измеренных значений в интервале полей 6–8 Тл, показывает, что при обеспечении достаточной стабилизации провод будет нести ток > 2160 А.

### 3 Изготовление и исследование образца кабеля с заданными параметрами

В первую очередь был изготовлен образец кабеля с заданными в спецификации параметрами. Исследования двух образцов провода, выплетенных из кабеля, показали, что:

- критический ток и показатель резистивного перехода  $n$ , характеризующий качество волокон, в выплетенных образцах существенно ниже, чем в исходном проводе. Деградация тока в магнитном поле 8 Тл составляет от 3,2 до 29 %, параметр  $n$  падает с 35–36 до 7–16, что указывает на значительное повреждение проводов при изготовлении кабеля;

- после удаления медной оболочки с выплетенных из кабеля проводов наблюдается повышенная обрывность волокон по сравнению с исходным состоянием провода. Повреждённые участки локализованы во внешней части кабеля в местах перегиба проводов, имеются места с массовой обрывностью волокон, которая визуально составляет от 15 до 30 %;

- RRR провода снизилось со 185 (исходное состояние) до 64 (после изготовления кабеля).

Таким образом, при изготовлении резерфордовского кабеля с углом транспонирования 20 град. размером 5,3 × 2,60 мм NbTi провод диаметром

1,4 мм с отношением Cu/non Cu = 0,95 не выдерживает деформации при компактировании и, следовательно, конструкция кабеля должна быть доработана.

### 4 Оптимизация параметров конструкции кабеля

Исследования по оптимизации параметров конструкции кабеля включали выбор опытных вариантов конструкции кабеля, изготовление экспериментальных коротких образцов кабеля выбранных конструкций и испытания проводов, выплетенных из этих экспериментальных образцов.

Обобщённый опыт по изготовлению NbTi кабелей для разных действующих магнитных систем показывает, что уплотнение кабелей по толщине обычно составляет от 7 до 15 %, а по ширине – от 6 до 10 % [3].

По сравнению с ближайшими аналогами, требования к резерфордовскому кабелю для магнита Target детектора PANDA [1] представляются слишком жёсткими. В табл. 2 приведены литературные данные по резерфордовским кабелям, используемым в подобных проводниках в алюминиевой оболочке для проектов ATLAS (CERN) [4] и Mu2e (Fermilab) [5]. В первую очередь в спецификации к кабелю для детектора PANDA [1] обращают на себя внимание очень большой угол (20 град.), и, следовательно, малый шаг транспонирования (~ 30 мм) по сравнению с приведёнными аналогами, а также повышенная степень уплотнения кабеля по ширине – 24 %.

На основе полученных результатов и анализа литературы были намечены пути оптимизации параметров конструкции кабеля с целью сохранения целостности волокон в проводе, а именно: уменьшение угла транспонирования и увеличение ширины кабеля, что существенно уменьшает деформацию краевых проводов.

Для расчёта ширины опытных кабелей на основе NbTi провода диаметром 1,4 мм мы воспользо-

Таблица 2

Данные по резерфордовским кабелям, используемым в проводниках в алюминиевой оболочке

№ п/п	Кабель	Габариты, мм	Число и диаметр стрендов, шт./мм	Угол и шаг транспонирования, град./мм	Обжатие по высоте, % (1)	Обжатие по ширине, % (2)	Деградация тока, %
1	ATLAS (CERN) [4]	2,2 × 7,4	12/1,22	14/60	9,8	7,5	–
2	Mu2e (Fermilab) [5]	2,63 × 8,74	12/1,466	12/84 (спецификация) 10/100 (массовое производство)	10 10	9,6 10,2	<5 1,7
3	PANDA (FAIR) [1]	2,6 × 5,3	8/1,4	20/30 (спецификация)	7	24	3–30

вались опытом по оптимизации конструкции резерфордовских кабелей на основе Nb<sub>3</sub>Sn проводов [6, 7]. Расчёт ширины опытных NbTi кабелей проведён на основе эмпирического выражения (4), взятого из работы [7], посвящённой опыту по оптимизации конструкции резерфордовских кабелей на основе Nb<sub>3</sub>Sn проводов в ЦЕРНе (Европейская организация по ядерным исследованиям, лаборатория физики высоких энергий):

$$W_{target} = N \cdot d / (2 \cdot \cos A) + 0,24 \cdot d \quad (4)$$

С использованием выражения (4) была пересчитана ширина кабеля при углах транспонирования 20–10 град. (табл. 3, столбец 4), а по формуле (2) рассчитана степень обжатия кабеля при увеличенной ширине для каждого угла (столбец 5). Кроме того, был рассчитан ожидаемый шаг транспонирования (столбец 7). Увеличение ширины кабеля позволяет держать степень его обжатия на уровне 10 %, что соответствует степени обжатия по ширине в ближайших аналогах (табл. 2).

Для проведения исследований были изготовлены и испытаны короткие образцы кабеля с углами транспонирования 20, 15, 14 и 12 град. и расчётной шириной (табл. 3, поз. 1, 3, 4 и 5).

В зависимости от угла транспонирования ширина изготовленных образцов кабеля на 0,8–1 мм больше заданного в первоначальных требованиях значения.

#### 4.1 Металлографические исследования поперечного сечения опытных кабелей

Поперечные сечения изготовленных образцов кабеля представлены на рис. 3. Хорошо видно, что увеличение ширины кабеля в соответствии с эмпирической формулой (4) позволяет заметно уменьшить искажение волоконной зоны в местах изгиба провода на боковых гранях кабеля.

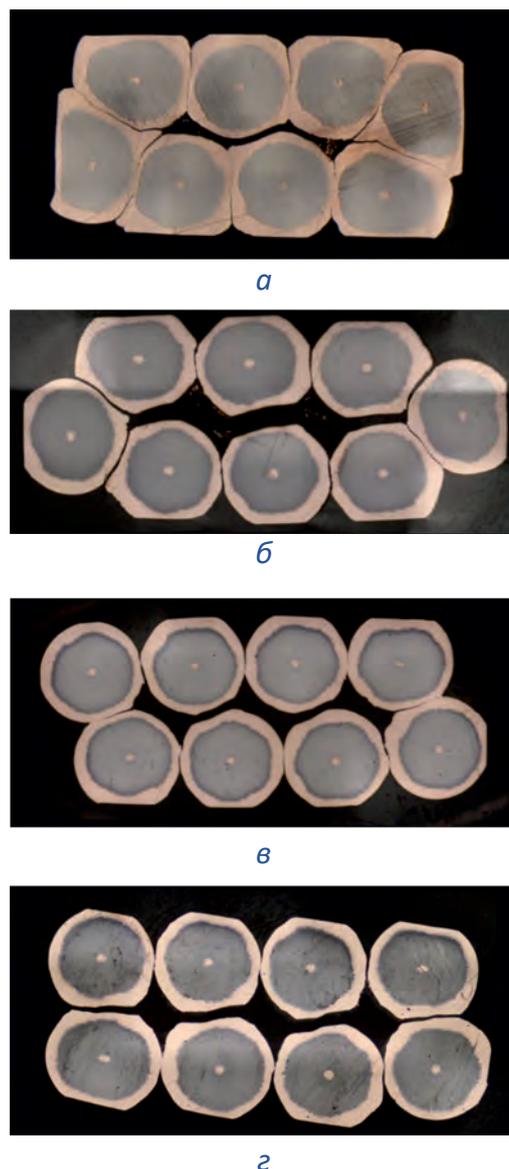


Рис. 3. Поперечные сечения образцов резерфордовского кабеля: а – кабель 5,3 × 2,6 мм, угол 20 град. (шаг ~ 30 мм); б – кабель 6,3 × 2,6 мм, угол 20 град. (шаг 34 мм); в – кабель 6,2 × 2,6 мм, угол 15 град. (шаг 46 мм); г – кабель 6,1 × 2,6 мм, угол 14 град. (шаг 49 мм)

Таблица 3  
Расчётные параметры опытных кабелей

№ п/п	Угол транспонирования, град.	cos A	Расчётная ширина, мм (4)	Расчётное обжатие по ширине, % (2)	tg A	Расчётный шаг транспонирования, мм
1	2	3	4	5	6	7
1	20	0,9397	6,3	9,8	0,3640	34
2	18	0,9511	6,22	10	0,3249	38
3	15	0,9659	6,13	10	0,2679	46
4	14	0,9703	6,11	10	0,2493	49
5	12	0,9781	6,06	10	0,2126	57
6	10	0,9848	6,02	10	0,1763	68

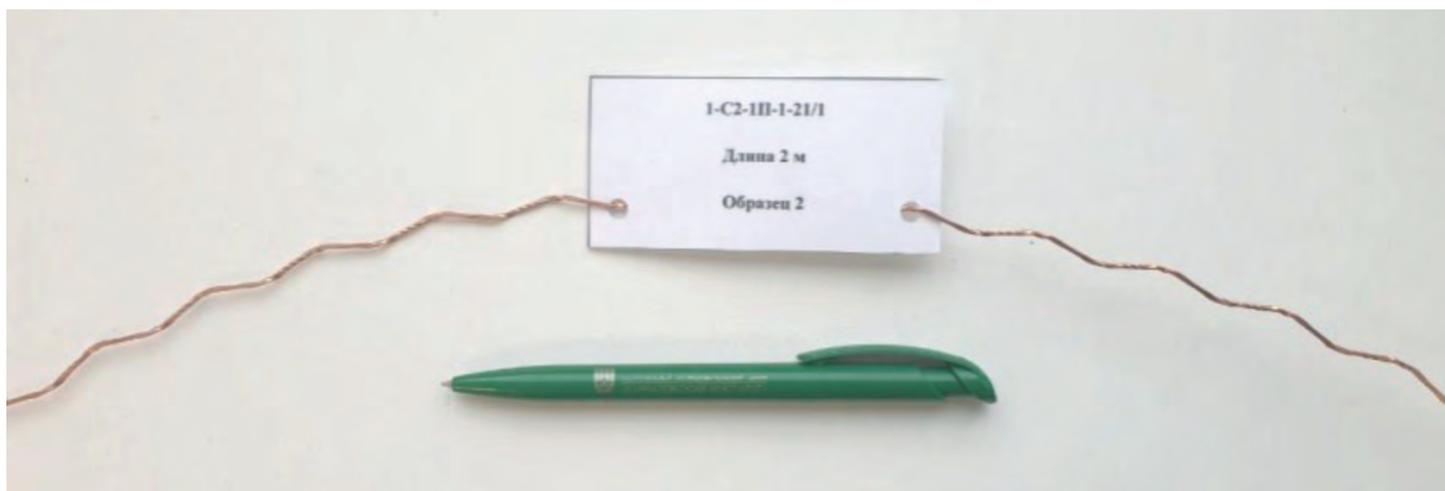


Рис. 4. Вид образца NbTi провода, выплетенного из резерфордовского кабеля размером  $2,6 \times 5,3$  мм, с углом транспонирования 20 град.

#### 4.2 Критический ток и показатель резистивного перехода

Измерить критический ток в извлечённых из кабеля проводах оказалось не просто, поскольку после изготовления кабеля провод был жёстким и сохранял зигзагообразную форму (рис. 4). Такая форма образца не позволяет использовать стандартную цилиндрическую оправку типа «VAMAS barrel» (Versailles Project on Advanced Materials and Standards), поскольку провод не укладывается в спиральные канавки, предусмотренные для исходного NbTi провода.

Попытки разогнуть образец при намотке на оправку для измерения тока приводят к существенной дополнительной деформации провода, в некоторых случаях и к его разрушению. Поэтому измерения проводили с использованием либо специальных оправок из фотополимерного пластика, учитывающих профиль деформированного NbTi провода, либо металлических оправок с расширенной канавкой.

В магнитных полях менее 7 Тл происходил срыв тока ниже его критического значения, поэтому оценку деградации тока проводили по данным, полученным в полях 7 и 8 Тл.

Тем не менее, по результатам испытаний удалось установить изменение параметра  $n$  и деградацию критического тока в выплетенных проводах в зависимости от деформации по ширине кабеля в процессе его компактирования (рис. 5).

Во всех испытанных вариантах опытных кабелей с деформацией по ширине  $\sim 10$  % (см. табл. 3) деградация критического тока не превышает 5 %, а показатель резистивного перехода  $n$  остаётся на уровне исходного провода ( $36 \pm 2$ ). Деградация критического тока в образцах из кабелей  $6,2 \times 2,6$  мм (угол 15 град., шаг 46 мм) и  $6,1 \times 2,6$  мм (угол 12 град., шаг 49 мм) составляет 2,5–3,3 %, а максимальная деградация тока (4,5 %) среди опытных образцов отмечена в проводе,

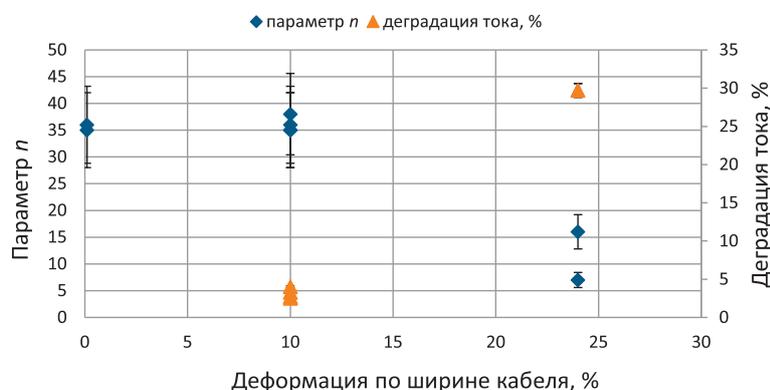


Рис. 5. Изменение параметра  $n$  и деградация критического тока в магнитном поле 8 Тл в выплетенных проводах в зависимости от деформации по ширине кабеля (компактирование)

выплетенном из кабеля  $6,3 \times 2,6$  мм (угол 20 град., шаг 34 мм).

На рис. 5 также представлены данные для провода, извлечённого из кабеля размером  $5,3 \times 2,6$  мм (угол 20 град., деформация по ширине 24 %), деградация критического тока в котором составляет до 30 %, а показатель резистивного перехода  $n$  снижается с 36 в исходном проводе до 7–16.

#### 4.3 Исследование состояния NbTi волокон

Состояние волокон в проводе после удаления медной матрицы путём травления в азотной кислоте представлено на рис. 6.

Если в исходном проводе обрывность волокон практически отсутствует (рис. 6 а, б), то в проводах, выплетенных из кабеля размером  $2,6 \times 5,3$  мм, имеются места с массовой обрывностью, которая визуально составляет до 30 % (рис. 6 в, г). Обрывы волокон преимущественно локализованы в местах перегиба провода.

В проводах, которые извлечены из образцов кабелей оптимизированных конструкций, разработанных

ных в соответствии с формулой (4), обрывность волокон практически отсутствует и существенно ниже допустимого уровня 5 % (рис. бд).

**4.4 Относительное остаточное электросопротивление**

В табл. 4 представлены данные по RRR для проводов в состоянии поставки и выплетенных из опытных кабелей разной ширины.

Среднее значение RRR падает со 185 для провода в состоянии поставки (поз. 1) до 64 для провода, выплетенного из кабеля размером 2,6 × 5,3 мм (поз. 2). Увеличение шага (уменьшение угла) транспонирования в кабеле размером 2,6 × 5,3 мм приводит к небольшому уменьшению деградации RRR – в среднем с 64 до 71 (поз. 3, 4).

Увеличение ширины кабеля с 5,3 до 6,1–6,3 мм (поз. 5, 6, 7), приводящее к снижению обжатия по ширине с 24 до ~ 10 %, способствует повышению RRR выплетенных проводов до 80–82 единиц. Эти значения близки к данным из [5], где степень обжатия резерфордовского кабеля по ширине также была на уровне ~ 10 %, а RRR выплетенных стрендов составляло 77–87 единиц.

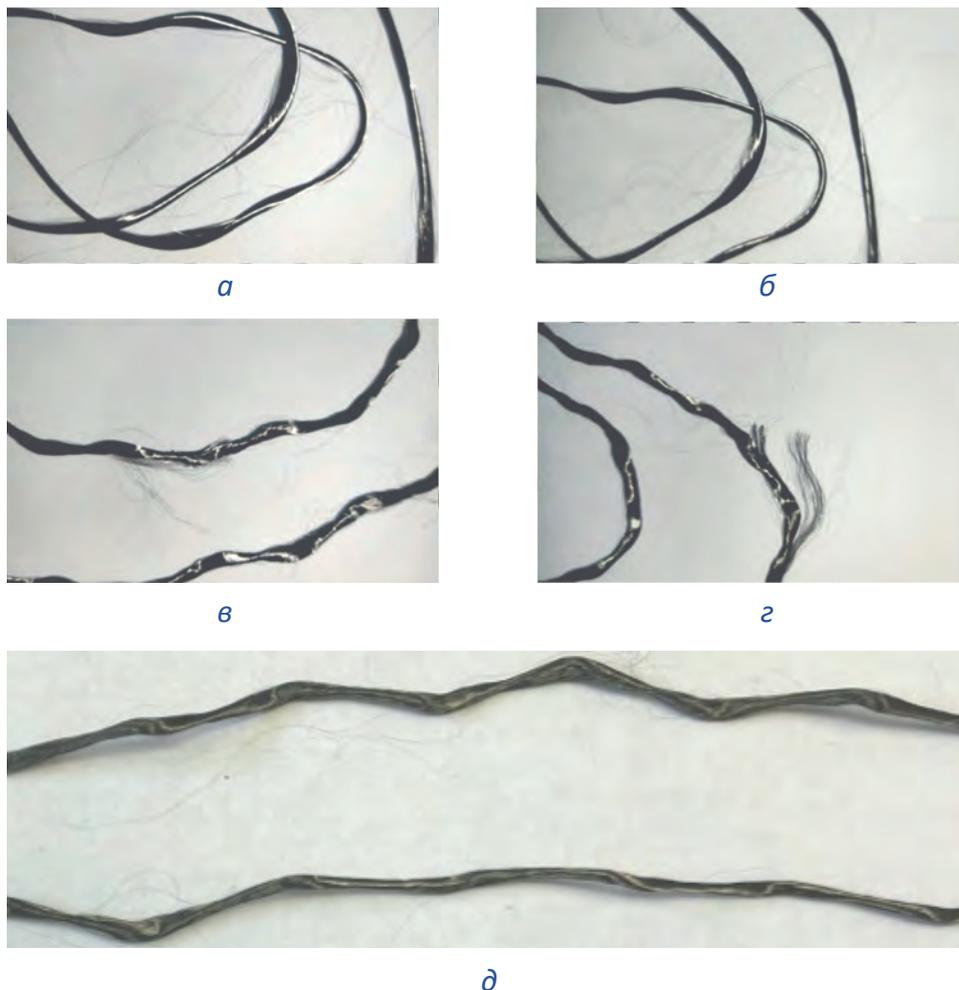


Рис. 6. Состояние волокон после удаления медной матрицы: а, б – образцы исходного провода; в, г – образцы проводов, выплетенных из кабеля размером 2,6 × 5,3 мм с углом транспонирования 20 град.; д – образцы проводов, выплетенных из кабелей размером 2,6 × 6,2 мм и 2,6 × 6,1 мм с углами транспонирования 15 и 14 град.

Таблица 4

Результаты определения RRR в проводах до и после скрутки опытных кабелей

№ п/п	Образец провода	Ширина кабеля, мм	Обжатие по высоте, %	Обжатие по ширине, %	Среднее RRR
1	В состоянии поставки	–	–	–	185
2	Из кабеля, шаг 30 мм	5,3	7	24	64
3	Из кабеля, шаг 46–48 мм	5,3	7	24	67
4	Из кабеля, шаг 58–65 мм	5,3	7	24	71
5	Из кабеля, шаг 34 мм	6,3	7	9,8	80
6	Из кабеля, шаг 46 мм	6,2	7	10	82
7	Из кабеля, шаг 49 мм	6,1	7	10	80

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Благодаря высокой конструктивной плотности тока, гибкости и механической устойчивости, кабели резерфордовского типа на основе NbTi и Nb<sub>3</sub>Sn

сверхпроводников широко используются в магнитах современных ускорителей элементарных частиц для создания высоких магнитных полей.

В настоящей работе проведена оптимизация конструкции резерфордовского кабеля для прямо-

угольного высокостабилизированного проводника магнита-детектора PANDA установки FAIR, направленная на сохранение токонесущей способности и других электрофизических характеристик исходного многоволоконного сверхпроводящего NbTi провода в процессе изготовления кабеля.

Оптимизация конструкции проведена за счёт уменьшения угла транспонирования и увеличения ширины кабеля, что позволило существенно уменьшить деформацию в местах изгиба провода на боковых гранях кабеля.

В проводах, выплетенных из кабелей оптимизированной конструкции, деградация критического тока не превышает 5 %, а показатель резистивного перехода  $n$ , характеризующий качество сверхпроводящих волокон, остаётся на уровне исходного провода. Увеличение ширины кабеля с 5,3 до 6,1–6,3 мм, приводящее при компактировании к снижению обжатия по ширине с 24 до ~ 10 %, способствует повышению RRR выплетенных проводов с 64 до 80–82 единиц.

Для изготовления опытного длинномерного образца резерфордовского кабеля рекомендовано 2 варианта конструкции: кабель размером 2,6 × 6,2 мм с шагом скрутки 46 мм и кабель размером 2,6 × 6,1 мм с шагом скрутки 49 мм. С точки зрения минимизации кабельных потерь [2, 8, 9] кабель шириной 6,2 мм с шагом скрутки 46 мм выглядит более предпочтительным. ■

#### Список источников

1. Procurement of the Superconductor for the Panda Detector Solenoid at FAIR, Darmstadt, Germany. Technical Specification. BUDKER INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS of Siberian Branch Russian Academy of Sciences. – Novosibirsk, 2016.

2. Потанина Л.В., Зубко В.В., Маринин К.С., Носов А.А., Каверин Д.С., Занегин С.Ю., Фетисов С.С., Высоцкий В.С. Изготовление кабелей резерфордовского типа на основе низкотемпературных сверхпроводников // Кабели и провода. 2022. № 5 (397). С. 9–17.

3. Luca Bottura and Arnaud Devred. Cable Design optimization for LTS Application / Report on LTS Cables. – CERN, 12 March 2013.

4. ATLAS Central Solenoid Technical Design Report. – 30 April 1997. Vol. 4. P. 25.

5. Kota Katayama, Keisuke Kitazato, Hirokazu Tsubouchi, Akira Takagi, Ricardo Tanaka and Joao Shigueoka. Results of R&D and production on two types of High purity Aluminum stabilized Superconducting cable // IEEE Trans on Applied Superconductivity. 2016. Vol. 26, No 3.

6. D.R. Dietderich, A. Godeke. Nb<sub>3</sub>Sn research and development in the USA – Wires and cables // Cryogenics. 2008. No 48. P. 331–340.

7. J. Fleiter, A. Bonasia, B. Bordini and A. Ballarino. Rutherford cable design approach and experience at CERN. – US-EuroCirCol cable meeting, 17 January 2017.

8. Sytnikov V.E., Svalov G.G., Akopov S.G., Peshkov I.B. Coupling losses in superconducting transposed conductors located in changing magnetic fields // Cryogenics. 1989. Vol. 29, No 9. P. 926–930.

9. Wilson M.N., Ghosh A.K., ten Haken B., Hassenzahl W.V., Kaugerts J. et al. Cored Rutherford cable for the GSI fast ramping synchrotron // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2003. Vol. 13, No 2. P. 1704–1709.

#### List of References

1. Procurement of the Superconductor for the Panda Detector Solenoid at FAIR, Darmstadt, Germany. Technical Specification. BUDKER INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS of Siberian Branch Russian Academy of Sciences. – Novosibirsk, 2016.

2. Potanina L.V., Zubko V.V., Marinin K.S., Nosov A.A., Kaverin D.S., Zanezin S.Yu., Fetisov S.S., Vysotsky V.S. Manufacture of Rutherford type cables based on LOW-temperature superconductors // Cables and Wire. 2022. № 5 (397). С. 9–17.

3. Luca Bottura and Arnaud Devred. Cable Design optimization for LTS Application / Report on LTS Cables. – CERN, 12 March 2013.

4. ATLAS Central Solenoid Technical Design Report. – 30 April 1997. Vol. 4. P. 25.

5. Kota Katayama, Keisuke Kitazato, Hirokazu Tsubouchi, Akira Takagi, Ricardo Tanaka and Joao Shigueoka. Results of R&D and production on two types of High purity Aluminum stabilized Superconducting cable // IEEE Trans on Applied Superconductivity. 2016. Vol. 26, No 3.

6. D.R. Dietderich, A. Godeke. Nb<sub>3</sub>Sn research and development in the USA – Wires and cables // Cryogenics. 2008. No 48. P. 331–340.

7. J. Fleiter, A. Bonasia, B. Bordini and A. Ballarino. Rutherford cable design approach and experience at CERN. – US-EuroCirCol cable meeting, 17 January 2017.

8. Sytnikov V.E., Svalov G.G., Akopov S.G., Peshkov I.B. Coupling losses in superconducting transposed conductors located in changing magnetic fields // Cryogenics. 1989. Vol. 29, No 9. P. 926–930.

9. Wilson M.N., Ghosh A.K., ten Haken B., Hassenzahl W.V., Kaugerts J. et al. Cored Rutherford cable for the GSI fast ramping synchrotron // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2003. Vol. 13, No 2. P. 1704–1709.