

## Сверхпроводящие характеристики сварных соединений особо чистого ниобия

С.Е. Демьянов, Е.Ю. Канюков

*НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19, г. Минск, 220072, Республика Беларусь*

E-mail: demyanov@physics.by

И.Л. Поболь, С.В. Юревич

*Физико-технический институт НАН Беларуси, ул. Купревича, 10, г. Минск, 220141, Республика Беларусь*

E-mail: i.pobol@gmail.com

М.А. Батурицкий

*НИУ «Научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий» БГУ  
ул. Первомайская, 18, помещение 403, г. Минск, 220088, Республика Беларусь*

E-mail: m\_batouritski@hep.by

Г.Д. Ширков, Ю.А. Будагов, Д.Л. Демин, Н.С. Азарян

*Объединенный институт ядерных исследований, ОИЯИ  
ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна, Московская обл., 141980, Российская Федерация*

E-mail: shirkov@jinr.ru

Статья поступила в редакцию 13 января 2015 г., опубликована онлайн 25 мая 2015 г.

Для создания сверхпроводящего резонатора для Международного линейного коллайдера (ILC) отрабатаны и оптимизированы режимы электронно-лучевой сварки особо чистого листового ниобия. Определены особенности формирования сварных соединений, изучены их микроструктура и микротвердость с учетом необходимой геометрии швов. Данные низкотемпературных электрических измерений в магнитных полях до 2 Тл позволили определить критические параметры сверхпроводящего перехода в области сварки. Выявленное незначительное ухудшение характеристик листового ниобия в области термических воздействий (в среднем около 10%) является непринципиальным с точки зрения сверхпроводящих свойств резонатора.

Для створення надпровідного резонатора для Міжнародного лінійного колайдера (ILC) відпрацьовано та оптимізовано режими електронно-променевого зварювання особливо чистого листового ніобію. Визначено особливості формування зварних з'єднань, вивчено їх микроструктуру та микротвердість з урахуванням необхідної геометрії швів. Дані низькотемпературних електричних вимірів у магнітних полях до 2 Тл дозволили визначити критичні параметри надпровідного переходу в області зварювання. Виявлене незначне погіршення характеристик листового ніобію в області термічних дій (в середньому близько 10%) є непринциповим з точки зору надпровідних властивостей резонатора.

PACS: 07.20.Ms Криогенная техника; холодильники, низкотемпературные детекторы и другое низкотемпературное оборудование;

29.20.Ej Линейные ускорители;

**74.25.-q** Свойства сверхпроводников;

81.20.Vj Соединение; сварка.

Ключевые слова: сверхпроводящий резонатор, особо чистый ниобий, электронно-лучевая сварка, температура и ширина сверхпроводящего перехода, критическое магнитное поле.

## Введение

Создание линейного коллайдера ILC (International Linear Collider) [1] важно как для подтверждения теоретических наработок в области физики элементарных частиц [2], так и для непосредственного применения в области материаловедения, медицины, химии, биологии и других наук [3]. Основным конструктивным элементом коллайдера ILC станут два 11-километровых линейных ускорителя (для встречных пучков электронов и позитронов), в каждом из которых будет приблизительно по 7400 сверхпроводящих резонаторов из особо чистого ниобия, которые в рабочем режиме должны находиться в сверхпроводящем состоянии при температуре жидкого гелия [4]. Создание резонаторов, удовлетворяющих требованиям ILC, является весьма непростой задачей, поскольку существует много факторов, приводящих к ухудшению их рабочих характеристик. Одной из технологических операций, требующих особого внимания, является сварка отдельных элементов резонатора, так как неудовлетворительное качество сварного соединения может привести к локальному нагреву и выводу резонатора из сверхпроводящего состояния. Так, из-за плохого качества электрических соединений между сверхпроводящими деталями Большого адронного коллайдера произошла его поломка, устранение последствий которой заняло больше года и привело к многомиллионным затратам [5,6].

В последние годы сверхпроводящие резонаторы из особо чистого ниобия изготавливаются несколькими фирмами, в частности для строящегося в DESY (Германия) лазера на свободных электронах XFEL [7–9]. Однако реализовать столь масштабный проект, как ILC, возможно только при взаимодействии специалистов из разных стран. Для решения данной проблемы в рамках сотрудничества Дубна–Беларусь в 2010 г. начата деятельность по созданию серии одноячеечных сверхпроводящих ниобиевых резонаторов для ускорителей электронов [10,11]. Одной из решаемых в рамках данного сотрудничества задач является определение влияния термического воздействия и сварки листового ниобия на его критические сверхпроводящие характеристики (критическое магнитное поле, температура и ширина сверхпроводящего перехода).

### Получение сварных соединений особо чистого ниобия

В настоящем исследовании использовались листы особо чистого ниобия (производства фирмы Ningxia OTIC, Китай) толщиной 2,8 мм, получаемого путем многократного электронно-лучевого переплава в высоком вакууме. В состоянии поставки ниобий имеет поликристаллическую структуру с размером зерен 30–50 мкм и содержанием примесей менее 100 ppm для металлов и менее 20 ppm для легколетучих компонент O,

S, N. Отношение сопротивления ниобия при комнатной температуре к сопротивлению при 4,2 К в нормальном проводящем состоянии металла, согласно паспортным данным листового ниобия, составляло  $RRR = 300$ . Из исходных листов при помощи гильотины отрубали пластины размером  $70 \times 25 \times 2,8$  мм для сварки и  $70 \times 50 \times 2,8$  мм — для исследования параметров исходного материала (контрольные образцы) и материала, подвергнутого электронно-лучевому воздействию с полным проплавлением. Кромки пластин обрабатывали на фрезерном станке.

Получение неразъемных соединений пластин ниобия проводили с применением электронно-лучевой сварки (ЭЛС) в вакууме [12]. Данный метод, в отличие от всех остальных существующих вариантов сварки, позволяет сохранить чистоту металла в зоне расплавления и термического влияния на уровне исходного материала за счет рафинирующего действия высокого вакуума и процессов вытеснения примесей при зонной перекристаллизации при затвердевании металла [13]. ЭЛС проводилась на оборудовании для электронно-лучевой обработки на базе энергоблока ЭЛА-15 («Сэлми», Сумы, ускоряющее напряжение 60 кВ, максимальная мощность луча 15 кВт, остаточное давление  $2 \cdot 10^{-3}$  Па).

Образцы для изучения сверхпроводящих характеристик вырезали из пластин методом электроэрозии таким образом, чтобы зона проплавления была посередине образца. Полученные образцы имели форму прямоугольных параллелепипедов с размерами  $40 \times 2 \times 2,8$  мм. Для удаления образовавшихся в результате резки дефектов и загрязнений с их поверхности стравливался поверхностный слой толщиной  $\sim 40$  мкм в смеси кислот HF, HNO<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Подробно методика и результаты травления представлены в нашей работе [14].

Анализ работ [15–21], в которых авторами были получены сварные соединения особо чистого ниобия с помощью электронно-лучевой сварки, свидетельствует о существовании зависимости между толщиной свариваемого металла  $S$  и вводимой при этом энергией, необходимой для получения требуемой геометрии и качества сварного шва. Приводимые в указанных литературных источниках параметры сварки сведены в табл. 1. Вводимое в процессе ЭЛС количество тепла приводится к погонной энергии сварки  $E_i$ , определяемой как количество энергии, которая вводится в единицу длины сварного шва (ГОСТ Р ИСО 857-1-2009):

$$E_i = U_{ac} \cdot I_w / V_w \quad (1)$$

Использование  $E_i$  за счет приведения к общему знаменателю таких параметров сварки, как ускоряющее напряжение  $U_{ac}$ , ток  $I_w$  и скорость сварки  $V_w$ , позволяет сравнивать количество тепла, вводимого при электронно-лучевом воздействии на различных установках.

В работе [17] предлагается для предварительного подогрева материала и очистки места соединения за

Таблица 1. Параметры ЭЛС особо чистого ниобия (литературные данные)

S, мм	Параметры режима ЭЛС				Источник
	$U_{ac}$ , кВ	$I_w$ , мА	$V_w$ , см/мин	$E_i$ , Вт·мин/см	
1,5	50	35	45	38,9	[15]
1,6	50	30	45	33,3	[16]
1,6	50	22	30	36,7	[17]
1,6	50	37	46	40,2	[17]
1,7	150	13	36	43,3	[18]
2	50	46	30	76,7	[19]
2	120	19	30	76	[20]
2	60	40	30	80	[20]
2,75	50	53	25	106	[21]
3	50	43	15	143,3	[19]

счет вытеснения примесей при зонной перекристаллизации перед сваркой проводить воздействие электронным лучом с энергией меньшей, чем при сварке. Так, используемые в работе энергетические параметры луча ( $U_{ac} = 150$  кВ,  $I_w = 7$  мА,  $V_w = 36$  см/мин) позволили получить проплавление материала толщиной 1,7 мм примерно на половину, при этом  $E_i$  составляла 29,2 Вт·мин/см. Предварительный подогрев позволил несколько уменьшить количество вводимой при основном проходе энергии, однако полученные исследователями значения параметров режима ЭЛС, необходимого для полного проплавления материала толщиной 1,7 мм, не выпадают из общей тенденции. Зависимость вводимой погонной энергии  $E_i$  от толщины свариваемого материала  $S$  приведена на рис. 1.

Значение погонной энергии сварки для ЭЛС листового ниобия толщиной  $S = 2,8$  мм определяли на основании аппроксимации данных, приведенных на рис. 1, по методу наименьших квадратов. Величина  $E_i \approx 124$  Вт·мин/см.

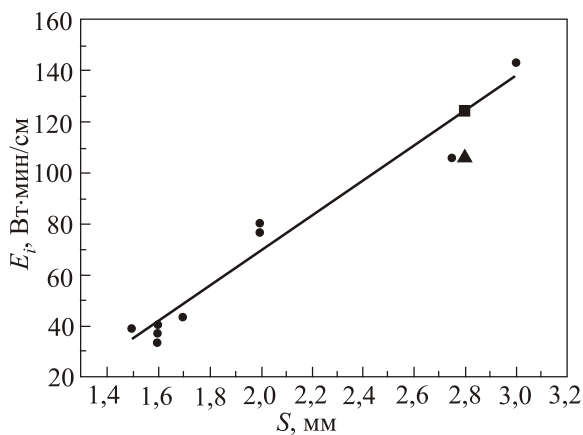


Рис. 1. Значение погонной энергии сварки, используемой для ЭЛС листового ниобия (составлено по данным табл. 1): литературные данные (•),  $E_i$ , полученное в результате аппроксимации (■),  $E_i$ , используемое в работе (▲), аппроксимация (—).

Проведенная в последующем серия экспериментов для уменьшения зоны термического влияния позволила снизить  $E_i$  до 106 Вт·мин/см. Такая величина вводимой погонной энергии обеспечивалась при следующих режимах ЭЛС: ускоряющее напряжение — 60 кВ, ток сварки — 53–55 мА, скорость сварки — 7–10 мм/с. Это обеспечивало получение сварного шва с шириной 4–5 мм у входа луча, 3–4 мм — у корня шва и провисание сварочной ванны — не более 0,5 мм.

### Микроструктура и микротвердость сварных соединений

Исследование микроструктуры и микротвердости сварного шва, изучение сверхпроводящих характеристик соединения проводилось на трех сериях образцов: контрольные (серия 0, вырезали из материала в состоянии поставки, не подвергавшегося термическому воздействию); проплавленные (серия 1, подвергались термическому воздействию электронным лучом по центру сплошного образца перпендикулярно его длинной стороне для получения зоны проплавления на всю толщину образца); сваренные (серия 2, получали посредством ЭЛС двух пластин). Схематическое изображение и фотографии образцов представлены на рис. 2.

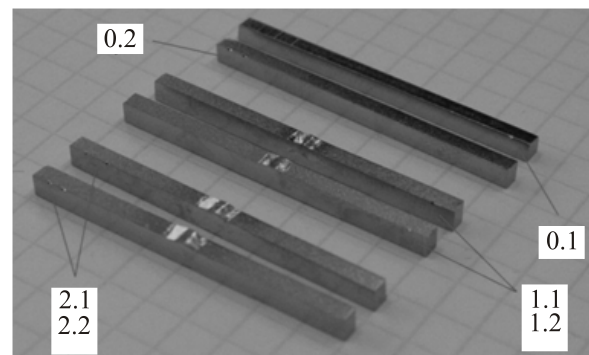
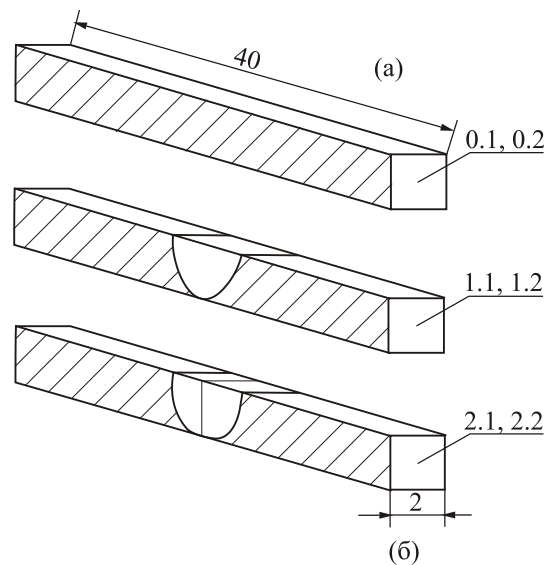


Рис. 2. Образцы для изучения сверхпроводящих характеристик: схематическое изображение (а); общий вид (б).

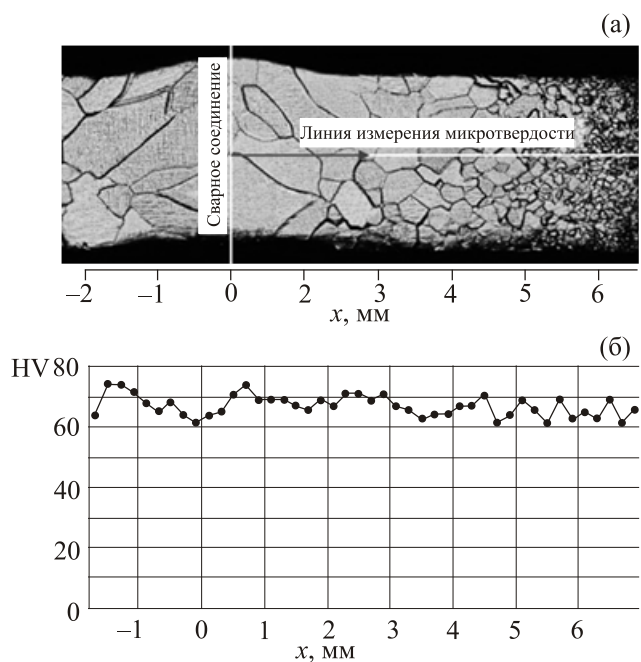


Рис. 3. Структура сварного соединения (а); распределение микротвердости в сварном соединении ниобия, полученном с помощью ЭЛС (б).

На поперечном сечении сварного соединения (рис. 3(а)), полученного с помощью ЭЛС двух пластин ниобия, видно, что зона термического воздействия составляет  $\sim 10$  мм и в ней наблюдается интенсивный рост зерна: 30–50 мкм в области, не подвергавшейся термическому воздействию (расстояние более 5 мм ортогонально шву); 100–200 мкм в зоне термического влияния (от 2 до 5 мм); до 1000 мкм в сварном шве (до 2 мм).

Измерение микротвердости сварных соединений проводили на микротвердомере ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1 2007 «Измерение твердости по Виккерсу». Нагрузка составляла 100 г, время приложения 10 с. Анализ изменения микротвердости вдоль заданной линии не выявил существенных изменений твердости сварного соединения по отношению к не подвергавшемуся термическому воздействию металлу (рис. 3(б)). Значения микротвердости в области, не подвергавшейся термическому воздействию и в зоне термического воздействия, находятся в пределах HV 60–70, для металла сварного шва — HV 60–75. Для сплошной пластины после воздействия электронным

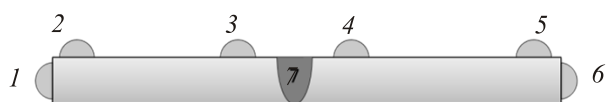


Рис. 4. Схема расположения индиевых контактов для изучения сверхпроводящих характеристик. 1, 6 — токовые контакты; 2–5 — потенциальные контакты; 7 — зона проплавки или сварного соединения.

лучом до полного проплавления полученное распределение микротвердости имеет аналогичный характер. Подобный характер распределения микротвердости в сварном соединении был получен в работе [17] для листового ниобия толщиной 2 мм производства фирмы Tokyo Denkai LTD (Япония) — колебания значений микротвердости металла сварного шва и основного металла находятся в пределах 5–10 HV.

### Сверхпроводящие характеристики сварного соединения

Изучение критических сверхпроводящих характеристик образцов проводили при измерении их резистивных характеристик, в том числе в магнитном поле. Для этого на поверхность ниобиевых образцов посредством ультразвуковой пайки индием наносили токовые и потенциальные контактные площадки размером  $\sim 1$  мм<sup>2</sup>, к которым подвели медные электроды. Схема расположения контактов представлена на рис. 4. Такой способ подведения электродов обеспечивал механически прочный и омический контакт с образцом даже в условиях термоциклирования в интервале температур 2–300 К и при воздействии магнитного поля.

Измерение электрофизических характеристик в широком интервале температур и магнитных полей проводили на резистивной вставке универсальной измерительной системы «Liquid Helium Free High Field Measurement System» фирмы «Cryogenic Ltd». Система содержит криостат замкнутого цикла, представляющий собой вакуумную камеру, в которой находится вставка с образцом, и сверхпроводящий магнит соленоидального типа. Поле устанавливалось и стабилизировалось при помощи откалиброванного источника тока Cryogenic Power Supply с точностью до 10 мТл.

Охлаждение образцов проводили при подаче гелия через игольчатый клапан в измерительную ячейку держателя. Для регулировки и стабилизации необходимой температуры использовали два нагревателя, один из которых располагался непосредственно в измерительной ячейке вблизи образца, а второй — в теплообменнике, находящемся между игольчатым клапаном и держателем. Температуру контролировали полупроводниковым GaAlAs-датчиком фирмы Lake Shore Cryogenics, имеющим стабильность  $\pm 5$  мК и калиброванным с точностью не хуже  $\pm 15$  мК при  $T < 20$  К  $\pm 50$  мК в интервале температур  $T = (20–50)$  К и  $\pm 110$  мК до температур  $T = 300$  К. Калибровка выполнена с учетом индукции магнитного поля во всем диапазоне его изменения.

При проведении измерений постоянный ток на образец подавали при помощи измерительно-питающего устройства «Keithley 2400», которое обеспечивало возможность задавать токи от 1 нА с погрешностью 0,5% при максимальной выходной мощности 100 Вт.

Для регистрации значений падения напряжения применяли электронный нановольтметр «Keithley 2182А», позволяющий измерять напряжения от 1 нВ с погрешностью 0,5%.

Измерения проводили четырехзондовым методом в режиме постоянного тока с коммутацией его направления для исключения влияния асимметричности контактного сопротивления и паразитных термо-ЭДС. Величина тока, называемого «измерительным», составила  $I = 0,2$  А и была выбрана экспериментально, исходя из критерия его минимальности. Это то значение, при котором с достаточной точностью регистрировалось падение напряжения на потенциальных контактах, а ток практически не влиял на истинную величину температуры и ширины сверхпроводящего перехода.

Влияние величины тока на критические сверхпроводящие характеристики образцов не изучали, поскольку известно и очевидно, что повышение плотности тока, вплоть до критических значений, приводит к подавлению сверхпроводимости и ее разрушению. Кроме того, значения объемной плотности постоянного тока не принципиальны, поскольку сварной ниобиевый резонатор в рабочем режиме будет функционировать при гелиевых температурах на частоте 1,3 ГГц. На таких частотах глубина скин-слоя составляет всего лишь 0,9 мкм при толщине стенок резонатора 2,8 мм. Соответственно,  $I$  не может оказать влияние на температуру перехода. Температурные зависимости сопротивления  $R(T)$  исследовали в режиме непрерывного охлаждения со скоростью 1 К/мин, достаточной для того, чтобы отклонение температуры от задаваемой в

момент измерения не превышало 0,1 К. Критические магнитные поля изучали при значениях внешнего магнитного поля с индукцией  $B$  до  $\pm 2$  Тл (шаг 0,05 Тл), ориентированного параллельно поверхности структуры и, соответственно, направлению тока при  $T = 4,2$  К с термостатированием в течение получаса перед началом измерений. Понятно, что влияние поперечного магнитного поля на процессы электропереноса в чистых металлах существеннее, чем продольного, прежде всего с точки зрения магниторезистивного эффекта. Однако в данном исследовании не ставилась такая цель, и вот почему. Во-первых, Nb имеет замкнутую поверхность Ферми, и при чистоте металла, соответствующей параметру  $RRR = 300$ , в магнитных полях до 2 Тл магнитосопротивление будет практически нулевым. Во-вторых, в области температур сверхпроводящего перехода такой эффект просто отсутствует из-за исчезновения свободных электронов с «фермиевской» статистикой.

Перечень образцов и план проведения их измерений приведены в табл. 2.

На рис. 5(а) показаны характерные температурные зависимости электросопротивления в интервале 4–300 К для образцов всех серий. В области температур 40–300 К, где сопротивление определяется в основном рассеянием электронов на коротковолновых фононах и статических дефектах, наблюдается линейное уменьшение  $R$  с понижением температуры, т.е. имеет место характерный металлический тип проводимости. Особенностью зависимостей  $R(T)$  в данной области температур является то, что электросопротивление подверг-

Таблица 2. Перечень и план проведения испытаний образцов, не подвергавшихся термическому воздействию (0.1, 0.2), после термообработки электронным лучом (1.1, 1.2) и сварного соединения двух пластин, полученного с помощью ЭЛС (2.1, 2.2)

№	Номер образца	Измеряемая характеристика	Параметры измерений
1	0.1	$R(T)$ $R(B)$	$T = 4-300$ К; $I = 0,2$ А; $B = 0; 0,5$ Тл; $T = 2-12$ К; $I = 0,2$ А; $B = 0-2$ Тл; $T = 4$ К; $I = 0,2$ А; шаг 0,05 Тл
2	0.2	$R(T)$ $R(B)$	$T = 4-300$ К; $I = 0,2$ А; $T = 2-12$ К; $I = 0,2$ А; $B = 0-2$ Тл; $T = 4$ К; $I = 0,2$ А; шаг 0,05 Тл
3	1.1	$R(T)$ $R(B)$	$T = 4-300$ К; $I = 0,2$ А; $T = 2-12$ К; $I = 0,2$ А; $B = 0-2$ Тл; $T = 4$ К; $I = 0,2$ А; шаг 0,05 Тл
4	1.2	$R(T)$ $R(B)$	$T = 4-300$ К; $I = 0,2$ А; $T = 2-12$ К; $I = 0,2$ А; $B = 0-2$ Тл; $T = 4$ К; $I = 0,2$ А; шаг 0,05 Тл
5	2.1	$R(T)$ $R(B)$	$T = 4-300$ К; $I = 0,2$ А; $T = 2-12$ К; $I = 0,2$ А; $B = 0-2$ Тл; $T = 4$ К; $I = 0,2$ А; шаг 0,05 Тл
6	2.2	$R(T)$ $R(B)$	$T = 4-300$ К; $I = 0,2$ А; $B = 0; 0,5$ Тл $T = 2-12$ К; $I = 0,2$ А; $B = 0-2$ Тл; $T = 4$ К; $I = 0,2$ А; шаг 0,05 Тл

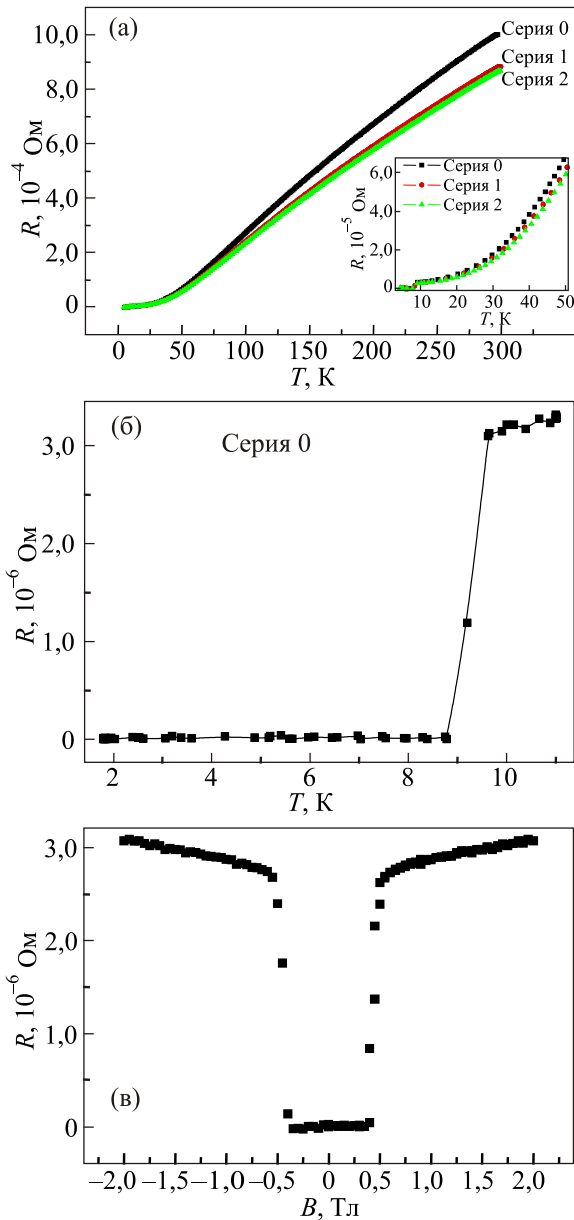


Рис. 5. (Онлайн в цвете) Температурные зависимости электросопротивления контрольных образцов (серия 0) на контактах 2–5 (см. рис. 3) в интервале температур 4–300 К (а); 2–11 К (б); магнитополевые зависимости электросопротивления (в).

шихся термическому воздействию образцов несколько ниже, чем у контрольных, что может быть связано с увеличением размера зерен металла при тепловой обработке с уменьшением вклада их границ в рассеяние носителей заряда.

В интервале ниже 40 К, вплоть до температуры сверхпроводящего перехода ( $\sim 9$  К), зависимости  $R(T)$  имеют степенной характер (закон Блоха–Грюнайзена [22]) с минимальным различием в электросопротивлении образцов различных серий (вставка к рис. 5(а)). Малое различие сопротивления образцов из различных серий является следствием того, что при данных температурах основной

вклад в  $R$  вносится за счет малоуглового рассеяния электронов проводимости на длинноволновых фононах.

Для обеспечения высокой точности измерения критических параметров сверхпроводящего перехода дополнительно проводили изучение  $R(T)$  в области температур сверхпроводящего перехода (в интервале 2–11 К, рис. 5(б)). Анализ зависимости позволил определить температуру окончания сверхпроводящего перехода  $T_c \approx 8,8$  К и его ширину  $\Delta T_c \approx 0,55$ – $0,6$  К для образцов ниобия в исходном состоянии, не подвергавшихся термическому воздействию. Результаты измерения магнитополевых зависимостей сопротивления  $R(B)$  при  $T = 4,2$  К (рис. 5(в)) позволили определить влияние магнитного поля на критические характеристики сверхпроводника и установить величину магнитного поля, при котором металл переходит в нормальное состояние ( $B_c \approx 0,5$  Тл), а также ширину данного перехода ( $\Delta B_c \approx 0,15$  Тл).

Аналогичные измерения для образцов, проплавленных электронным лучом поперек пластины (серия 1), показали, что зависимости  $R(T)$ , измеренные на различных парах потенциальных контактов, имеют похожий характер (рис. 6(а)). Идентичность критических сверхпроводящих параметров ( $T_c \approx 8,6$  К,  $\Delta T_c \approx 0,7$  К)

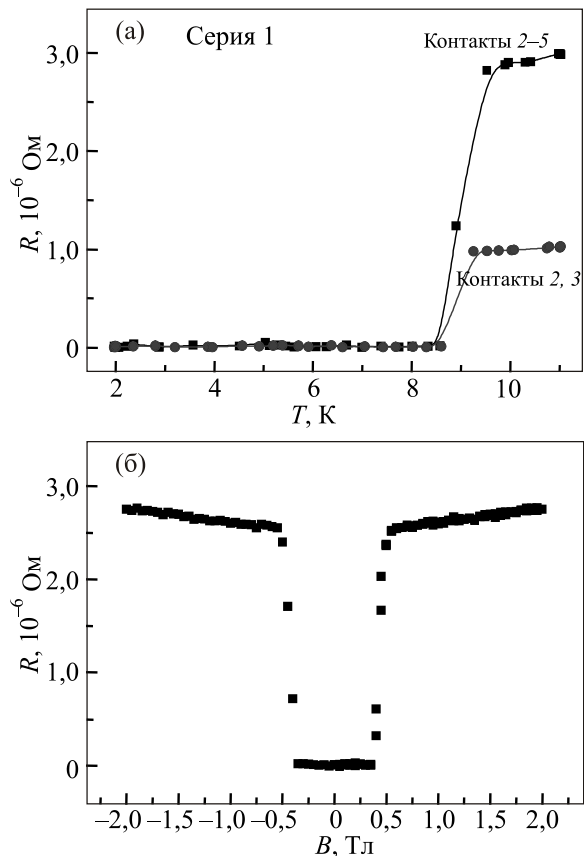


Рис. 6. Температурные зависимости электросопротивления проплавленных образцов (серия 1) на контактах 2–5 и 2, 3 (см. рис. 3) (а); магнитополевые зависимости электросопротивления на контактах 2–5 (б).

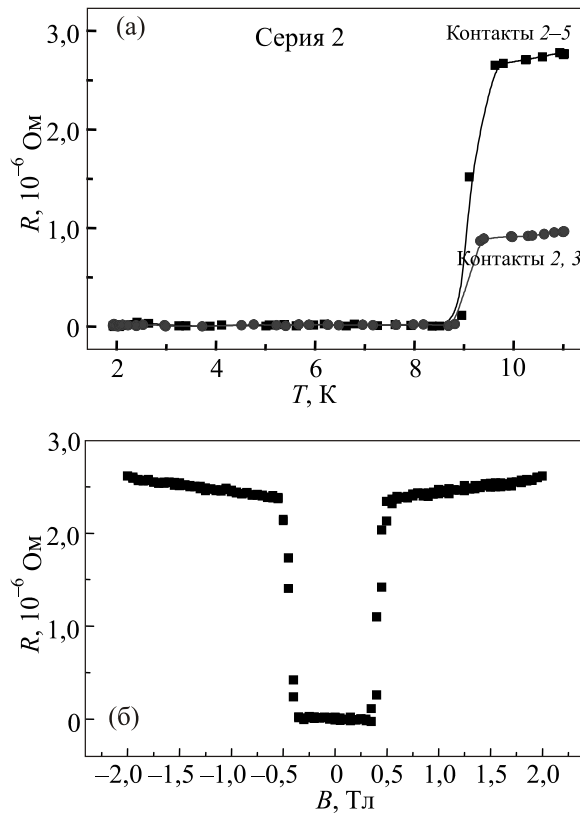


Рис. 7. Температурные зависимости электросопротивления сваренных образцов (серия 2) на контактах 2–5 и 2, 3 (см. рис. 3) (а); магнитолевые зависимости электросопротивления на контактах 2–5 (б).

свидетельствует, что проплавление электронным лучом не вносит ощутимых изменений в изучаемые характеристики ниобиевых образцов, приводя лишь к небольшому понижению температуры окончания сверхпроводящего перехода и увеличению его ширины по отношению к контрольным образцам. Незначительное ухудшение характеристик имеет место также и в магнитных полях: критические значения  $B_c$  уменьшаются до 0,4 Тл, а ширина перехода  $\Delta B_c$  возрастает до 0,25 Тл (рис. 6(в)). На рис. 7 приведены результаты исследований образцов, представляющих собой неразъемное соединение двух пластин, полученное методом ЭЛС. Значения температуры перехода  $T_c$  как до зоны сварки отдельных частей, так и после нее соответствуют проплавленным (рис. 6). Аналогичная ситуация имеет место и для критического магнитного поля  $B_c$  и ширины перехода этих образцов в магнитном поле.

Идентичность электрофизических характеристик проплавленных и сваренных образцов свидетельствует о том, что сверхпроводящие свойства ниобиевых образцов зависят от условий термического воздействия, которое изменяет микроструктуру (в частности, приводят к увеличению размера поликристаллических зерен) и не зависят от параметров ЭЛС. Несмотря на процессы рекристаллизации в области термического

Таблица 3. Критические характеристики сверхпроводящего перехода (температура окончания сверхпроводящего перехода ( $T_c$ ), ширина температурного перехода ( $\Delta T_c$ ), критическое магнитное поле сверхпроводника ( $B_c$ ), ширина магнитного перехода ( $\Delta B_c$ )) образцов, не подвергавшихся термическому воздействию (серия 0), после термообработки электронным лучом (серия 1) и сварного соединения двух пластин, полученного с помощью ЭЛС (серия 2).

Образцы	Параметры			
	$T_c$ , К	$\Delta T_c$ , К	$B_c$ , Тл	$\Delta B_c$ , Тл
Серия 0	~8,8	~0,55–0,6	~0,5	~0,15
Серия 1	~8,6	~0,65–0,7	~0,4	~0,2–0,25
Серия 2	~8,6	~0,65–0,7	~0,4	~0,2–0,25

воздействия, 10% ухудшение критических сверхпроводящих свойств естественно, так как в области термообработки металл становится более дефектным за счет концентрации примесных элементов в зоне проплава.

Для большей наглядности сравнительные характеристики контрольного, проплавленного и сваренного образцов приведены в табл. 3.

### Закключение

Показано, что при выбранных режимах электронно-лучевой сварки особо чистого листового ниобия толщиной 2,8 мм (ускоряющее напряжение 60 кВ, ток сварки 53 мА, скорость сварки 10 мм/с, остаточное давление  $5 \cdot 10^{-3}$  Па) полная зона термического воздействия, составляющая ~10 мкм, превосходит в 2,5 раза ширину зоны проплавления. Наблюдается увеличение среднего размера поликристаллического зерна от 30–50 мкм на границе зоны термического воздействия до 1000 мкм в зоне проплавления. Увеличение размеров зерен приводит к уменьшению электросопротивления ниобия в интервале температур 40–300 К с уменьшением электронного рассеяния на межзеренных границах. При температурах ниже 40 К это различие нивелируется.

Проведенные исследования критических параметров сверхпроводящего ниобия свидетельствуют о незначительном ухудшении сверхпроводящих свойств листового ниобия при термической обработке. Ухудшение сверхпроводящих свойств проплавленных и сваренных образцов по сравнению с образцами, не подвергавшимися термическому воздействию, обусловлено повышением концентрации примесных элементов в зоне проплавления.

Исследование выполнено в рамках контракта с ОИЯИ № 200/1130 от 19 апреля 2011 г. в рамках темы в ОИЯИ 02-0-1067-2007-2012 «Международный линейный коллайдер: ускорительная физика и техника» (с 2013 г. тема 02-0-1067-2007/2015, «Исследования в области  $e+e$ -линейных ускорителей и коллайдеров нового поколения для фундаментальных и прикладных целей»).

1. *The International Linear Collider. Gateway to Quantum Universe. Draft October 2014.* Global design Effort, <http://www.linearcollider.org>.
2. G.V. Trubnikov, Yu.A. Budagov, Yu.N. Denisov, G.A. Kozlov, N.A. Tokareva, S.B. Vorozhtsov, and V.V. Ivanov, *International Linear Collider*, A.N. Sissakian and G.D. Shirkov (general editorship), Dubna, Joint Institute for Nuclear Research (2008).
3. А. Понятов, *Наука и жизнь* **10**, 2 (2013).
4. T. Behnke, J.E. Brau, B. Foster, J. Fuster, M. Harrison, J. McEwan Paterson, M. Peskin, M. Stanitzki, N. Walker, and H. Yamamoto, *The International Linear Collider: Technical Design Report 1* (2013).
5. L. Rossi, *Supercond. Sci. Technol.* **23**, 034001 (2010).
6. G. Brumfiel, *Nature* **463**, 1008 (2010).
7. X. Singer, E. Filimonova, D. Reschke, A. Rostovtsev, W. Singer, T. Tokareva, and V. Zaharov, *Nucl. Instr. Meth. A* **574**, 518 (2007).
8. W. Singer, *Technical Specification for Large Crystal Niobium Discs Applied for the Fabrication of 1.3 GHz Superconducting Cavities*, DESY, Hamburg (2008).
9. B. Wands and M. Wong, *Pressure Vessel Engineering Note For the 1.3-GHz Helium Vessel*, Dressed Cavity AES-008, Batavia, FERMILAB Technical Division (2011).
10. N. Azaryan, J. Boudagov, D. Demin, G. Shirkov, M. Baturitsky, V. Karpovich, N. Lubetsky, S. Maximov, V. Rodionova, S. Kolosov, A. Kurayev, A. Sinitsyn, I. Pobol, A. Pokrovsky, S. Yurevich, A. Zhuravsky, S. Demyanov, and E. Kanyukov, *Материалы конференции «RuPAC 2012»*, Санкт-Петербург, (2012), с. 602.
11. N.S. Azaryan, Ju.A. Boudagov, D.L. Demin, V.V. Glagolev, G.D. Shirkov, G.V. Trubnikov, M.A. Baturitsky, N.M. Shumeiko, V.A. Karpovich, N.V. Lubetsky, S.I. Maximov, V.N. Rodionova, S.V. Kolosov, A.A. Kurayev, A.O. Rak, A.K. Sinitsyn, S.E. Demyanov, E.Yu. Kanyukov, A.A. Parshuto, V.S. Petrakovsky, I.L. Pobol, A.I. Pokrovsky, S.V. Yurevich, A.Yu. Zhuravsky, A. Ermakov, K. Singer, and W. Singer, *Proceedings of the «IPAC 2013» Conference*, Shanghai, (2013), p. 2393.
12. А.А. Шипко, И.Л. Поболь, И.Г. Урбанб, *Упрочнение сталей и сплавов с использованием электронно-лучевого нагрева*, Минск, Наука і тэхніка (1995).
13. В.Н. Алехнович, А.В. Алифанов, А.И. Гордиенко, И.Л. Поболь, *Электронно-лучевая обработка материалов*, Белорусская наука, Минск (2006).
14. Н.И. Азарян, М.А. Батурицкий, Ю.А. Будагов, Д.Л. Демин, А. Ермаков, А.А. Паршутто, И.Л. Поболь, К. Сингер, Г.Д. Ширков, Н.М. Шумейко, С.В. Юревич, *Материалы конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ к 100-летию В.П. Дзержелова*, Дубна (2013), с. 116.
15. J.L. Kirchgessner, *Proceedings of The Third Workshop on RF Superconductivity*, Illinois (1987), p. 533.
16. R.L. Geng, J. Knobloch, and H. Padamsee, *Proceedings of the 1999 Workshop on RF Superconductivity*, New Mexico (1999), p. 238.
17. H. Padamsee, J. Knobloch, and T. Hays, *RF Superconductivity for Accelerators*, John Wiley & Sons, New York (1998).
18. A. Schmidt, A. Brinkmann, J. Iversen, A. Matheisen, D. Reschke, M. Schäfer, W. Singer, V. Sousa, J. Tiessen, and D. Vermeulen, *1.3 GHz Niobium Single-Cell Fabrication Sequence. TTC Report, № 2010-01* (2010).
19. J. Brawley, J. Mammosser, and L. Phillips, *Proceedings of the 1997 Workshop on RF Superconductivity*, Padova (1997), p. 518.
20. H. Jiang, T.R. Bieler, C. Compton, and T.L. Grimm, *Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference*, Portland (2003), p. 1359.
21. T. Kubo, Y. Ajima, H. Hayano, H. Inoue, S. Kato, T. Saeki, M. Sawabe, K. Umemori, Y. Watanabe, S. Yamaguchi, and M. Yamanaka, *Proc. «IPAC 2013» Conf.*, Shanghai (2013), p. 2346.
22. Ф. Блаат, *Физика электронной проводимости в твердых телах*, Наука, Москва (1971).

### Superconducting characteristics of ultra-pure niobium welded joints

S.E. Demyanov, E.Yu. Kaniukov, I.L. Pobol, S.V. Yurevich, M.A. Baturitsky, G.D. Shirkov, Yu.A. Budagov, D.L. Demin, and N.S. Azaryan

To produce a superconducting resonator for International Linear Collider (ILC) the modes of electron-beam welding of ultra-pure niobium sheets have been developed and optimized. The characteristic features of welded joint formation have been determined. Their microstructure and microhardness were investigated with due account of the required geometry of the weld seam. The results of the low-temperature measurements of electrical characteristics in magnetic fields up to 2 T have made it possible to determine the critical parameters of the superconducting transition in the weld area. The observed insignificant degradation of the sheet niobium superconducting characteristics in the region of thermal action (on the average about 10%) is not of fundamental importance from the standpoint of superconducting properties of the resonator.

PACS: 07.20.Mc Cryogenics; refrigerators, low-temperature detectors, and other low-temperature equipment;  
 29.20.Ej Linear accelerators;  
 74.25.-q Properties of superconductors;  
 81.20.Vj Joining; welding.

Keywords: superconducting resonator, ultra-pure niobium, electron-beam welding, temperature and width of the superconducting transition, critical magnetic field.