

УДК В 669.293-62.41

**РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВЫПУСК ОПЫТНЫХ ПАРТИЙ
НИОБИЕВЫХ СЛИТКОВ И ЛИСТОВ ДЛЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ
РЕЗОНАТОРОВ**

*¹И.М. Абдюханов, ¹М.В. Алексеев, ^{1,5}М.В. Крылова, ¹А.С. Цаплева, ¹М.М. Потапенко,
¹М.В. Кравцова, ¹М.В. Поликарпова, ¹Д.С. Новосилова, ¹П.А. Лукьянов,
²С.Ю. Сырцов, ²Е.Н. Ряховская, ²А.В. Волошин, ³С.М. Зернов, ³М.Ю. Шляхов,
⁴Д.С. Быченко*

¹АО «ВНИИНМ», Москва

²АО ЧМЗ, Глазов

³АО «ТВЭЛ», Москва

⁴БГУ, Минск

⁵РТУ МИРЭА, Москва

Основным материалом для изготовления высокочастотных сверхпроводящих резонаторов в большинстве действующих и вновь сооружаемых по всему миру линейных ускорителях заряженных частиц является ниобий особой чистоты с высоким параметром RRR.

В статье представлены результаты проведения НИОКР в АО «ВНИИНМ» совместно с АО ЧМЗ по разработке технологии получения и выпуску опытных партий слитков и листов из ниобия особой чистоты с высоким параметром RRR и комплексом других характеристик, требуемых для создания сверхпроводящих резонаторов.

Ключевые слова: ниобий, сверхпроводящий резонатор, электронно-лучевая плавка, рекристаллизационный отжиг, RRR, размер зерна.

MANUFACTURE REGIMES DEVELOPMENT AND THE PILOT BATCHES PRODUCTION OF THE NIOBIUM INGOTS AND SHEETS FOR THE SUPERCONDUCTING CAVITIES

¹I.M. Abdyukhanov, ¹M.V. Alekseev, ^{1,5}M.V. Krylova, ¹A.S. Tsapleva, ¹M.M. Potapenko,
¹M.V. Kravtsova, ¹M.V. Polikarpova, ¹D.S. Novosilova, ¹P.A. Lukyanov, ²S.Y. Syrtsov,
²E.N. Riahovskaya, ²A.V. Voloshin, ³S.M. Zernov, ³M.Y. Shlyakhov, ⁴D.S. Bychanok

¹JSC VNIINM, Moscow

²SC ChMP, Glazov

³JSC TVEL, Moscow

⁴BSU, Minsk

⁵RTU MIREA, Moscow

High-purity niobium with high RRR value is the general material for the superconducting RF cavities production for the Linear Colliders all over the world.

Results of the manufacture regimes development and the pilot batches production of the high-purity niobium ingots and sheets with high RRR value for the superconducting cavities carried out jointly by JSC VNIINM and SC ChMP are presented in the paper.

Keywords: niobium, superconducting cavity, electron beam melting, recrystallization annealing, RRR, grain size.

Введение

На сегодняшний день в мире находится в стадии проектирования, строительства или уже запущены в эксплуатацию ряд крупных ускорительных систем (EXFEL, MYRRHA, ESS, ILC, NICA, FCC и др.), имеющих в своем составе линейные ускорители со сверхпроводящими резонаторами [1, 2, 3, 4].

Основным материалом для изготовления сверхпроводящих резонаторов является особоочищенный ниобий с высоким параметром RRR (как правило, более 300) [5]. Параметр относительного остаточного сопротивления RRR определяется как отношение сопротивлений металла при температурах 300 К и 4,2 К. Чем выше у металла данный параметр, тем более высокой химической чистотой он обладает и тем меньше имеет дефектов кристаллической решетки. Помимо низкого содержания примесей, ниобий в виде листов должен обладать достаточной прочностью и высокой пластичностью, иметь однородную мелкозернистую структуру, высокое качество поверхности и др.

Потребность в высокоочищенном ниобии для крупных проектов может исчисляться тоннами, например: с целью изготовления комплектующих для 1,3 ГГц 9-ячеистых

резонаторов в проекте EXFEL (г. Гамбург, Германия) понадобилось около 20 тонн ниобия высокой чистоты [1].

В 2017-2018 гг. из Европейского Центра Ядерных Исследований (ЦЕРН, г. Женева, Швейцария) и Белорусского Государственного Университета (БГУ, г. Минск, Республика Беларусь) в АО «ТВЭЛ» и АО «ВНИИНМ» поступили запросы о возможности изготовления и поставки ниобиевых листов резонаторного класса толщиной от 2 до 4 мм с RRR более 300 и комплексом других характеристик. С целью расширения номенклатуры действующего в АО ЧМЗ производства металлического ниобия для сверхпроводников и сплавов ядерной энергетики руководством АО «ТВЭЛ» был открыт проект НИОКР по разработке технологии получения листов по спецификации ЦЕРН. Результаты этой работы, которая проводилась в АО «ВНИИНМ» и АО ЧМЗ в 2019-2022 гг., представлены в данной статье.

Основными целями данной НИОКР являлись:

- разработка требований к исходному сырью и режимов электронно-лучевых переплавов (ЭЛП) слитков ниобия для сверхпроводящих резонаторов в промышленных условиях с высоким параметром RRR;
- разработка режимов изготовления ниобиевых листов для сверхпроводящих резонаторов с требуемым параметром RRR;
- проведение сопоставительных измерений параметра RRR образцов ниобиевых слитков и листов в АО «ВНИИНМ» и сторонней референсной лаборатории.
- подтверждение воспроизводимости технологии получения листов и слитков.

Весь комплекс работ выполнялся на существующем оборудовании АО «ВНИИНМ» и АО ЧМЗ.

1. Требования к ниобиевым листам для сверхпроводящих резонаторов

В качестве требований к листам резонаторного ниобия для задач данной НИОКР была выбрана стандартная спецификация ЦЕРН [6] (табл. 1).

Ранее разработанные в АО «ВНИИНМ» режимы получения ниобиевых листов, используемых при изготовлении композиционных Nb_3Sn сверхпроводников, не позволяли достичь требуемых характеристик. В связи с этим потребовалось разработать требования к исходному сырью для выплавки ниобиевых слитков и режимы плавки слитков с RRR около 400, а также разработать режимы деформации и термической обработки ниобиевых листов, обеспечивающие достижение всего требуемого комплекса характеристик, включая и величину параметра RRR более 300.

Таблица 1

Требования к ниобиевым листам для резонаторов

№	Характеристика	Требуемое значение
1	Толщина × Ширина × Длина, мм	2×200×300
2	RRR	≥300
3	Средний размер зерна, мкм	≤45
4	Доля рекристаллизованного объема, %	100
5	Твердость по Виккерсу HV	≤60
6	Предел прочности при растяжении, МПа	≥140
7	Предел текучести, МПа	65-100
8	Относительное удлинение, %	≥30
9	Шероховатость поверхности стороны №1, Rt, мкм	≤15
10	Шероховатость поверхности стороны №2, Rt, мкм	≤60
11	Браковочный уровень сигнала при ультразвуковом контроле	29 дБ
12	Химический состав слитков и листов, масс. %	C≤0,001, N≤0,001, O≤0,001, H≤0,0002, Zr≤0,01, Ta≤0,05, Fe≤0,005, Si≤0,005, W≤0,007, Ni≤0,003, Mo≤0,005, Hf≤0,005, Ti≤0,005, Cr+Co≤0,005

Как видно из табл. 1, к ниобиевым листам для сверхпроводящих резонаторов предъявляется целый комплекс требований, одновременное достижение которых является сложной научно-технологической задачей и имеет компромиссный характер. Это связано с тем, что, например, при формировании требуемой мелкозернистой структуры листов в материале становится больше дефектов, что, в свою очередь, снижает параметр RRR. От температуры заключительного отжига листов сильно зависят такие характеристики как параметр RRR, средний размер зерна, механические свойства. Основной задачей работы являлся подбор оптимальных режимов деформации и рекристаллизации для одновременного достижения всех требуемых свойств ниобиевых листов. Разработанная технология должна обеспечивать возможность мелкосерийного выпуска партий листов резонаторного класса.

Параметр RRR ниобиевых листов для сверхпроводящих резонаторов должен быть более 300, что подразумевает низкое содержание примесей и малое количество дефектов структуры [7].

2. Методы исследований и используемое оборудование

Измерения параметра RRR проводили на образцах ниобия размером 2×2×60 мм от слитка и листа по методике 400-4296/1-2021МВИс и в соответствии со стандартами, предписанными спецификацией ЦЕРН.

Измерения механических свойств при растяжении проводили в соответствии с ASTM B393-09, ASTM E8-13 на образцах, отбираемых вдоль и поперек направления прокатки ниобиевых листов. Измерения твердости по Виккерсу проводили в соответствии со стандартом ISO 6507 – 1-2007.

Фотографии микроструктуры поперечного и продольного сечения образцов ниобиевых листов получали на инвертированном оптическом микроскопе Leica DMi8 с увеличением до 500 крат. Измерение среднего размера зерна проводили методом секущих в соответствии со стандартом ASTM E112-13.

Химический анализ ниобия на содержание примесей в слитке и листе проводили по следующим методикам: водород – ОИ 001.489-2006; цирконий, гафний – ОИ 001.620-2006; железо, кремний, никель, титан, хром – МВИ 08-171-2007; молибден, вольфрам, кобальт – МВИ 08-194-2010; тантал – МВИ 08-239-2016; углерод – ОИ 001.472-2006, инфракрасно-абсорбционный метод; кислород, азот – МВИ 08-257-2022 (разработана для целей данной работы с целью увеличения точности измерений), метод восстановительного плавления. Были доработаны методы пробоотбора и пробоподготовки.

3. Разработка режимов изготовления и выпуск опытной партии слитков ниобия резонаторного класса

Исходным полуфабрикатом для получения листов резонаторного ниобия являются слитки, полученные методом многократных ЭЛП [8, 9]. При этом для гарантированного обеспечения $RRR > 300$ на листах слитки должны иметь большее значение данного параметра (около 400).

За основу была взята штатная технология выплавки слитков ниобия высокой чистоты в АО ЧМЗ марки НБМ по ТУ 001.395-2006 (для сверхпроводящих материалов), состоящая из алюмокальциетермического восстановления пентаоксида ниобия и последующих ЭЛП. Как правило, штатные слитки марки НБМ производства АО ЧМЗ имеют значения параметра RRR порядка 80-100, наибольшие значения RRR не превышают 170. Ключевым фактором, влияющим на RRR слитков, является чистота исходного пентаоксида ниобия. На основании литературных данных [9, 10] и опыта работы с ниобием для сверхпроводников АО «ВНИИНМ» были разработаны требования к химическому составу пентаоксида ниобия Nb_2O_5 , отличительной особенностью которого является низкое содержание примесей тугоплавких металлов.

На первом этапе работы в АО ЧМЗ из партии высокочистого пентаоксида ниобия были изготовлены экспериментальные слитки ниобия диаметром 135-152 мм и длиной 150-577 мм по различным технологическим схемам, разработанным АО «ВНИИНМ». В этих технологических схемах варьировались такие основные параметры, как количество электронно-лучевых переплавов (ЭЛП), скорость плавки и мощность электронного луча на кристаллизатор. По итогам экспериментальных плавок были

установлены оптимальные технологические параметры плавки, которые позволили получить 4 слитка (№№ 2063-20, 2093-20, 2094-20, 2226-21) со значением RRR=406-733 и твердостью $39,2 \div 44,1$ НВ. Важную роль в достижении требуемых характеристик слитков сыграла подготовка плавильного оборудования к плавкам и его тщательная зачистка.

Далее, для подтверждения возможности получения листов с требуемыми характеристиками из полученных слитков были изготовлены экспериментальные партии листов (раздел 4).

С использованием режимов плавки, разработанных в 2020-2021 гг., в 2022 году была изготовлена опытная партия, состоящая из трех слитков ниобия диаметром 135-145 мм и общей массой 344 кг с RRR >450. Основной задачей на данном этапе являлся набор статистических данных, фиксация допустимых значений основных технологических параметров выплавки слитков и подтверждение воспроизводимости. С целью исследования химического состава, твердости, RRR каждый слиток был разделен на две части, а из середины слитка были вырезаны темплеты. В итоге было получено 6 половин слитков длиной 428-645 мм. Химический состав полученных слитков приведен в табл. 2.

Таблица 2

Результаты химического анализа ниобиевых слитков опытной партии (масс. %)

Элемент	Номер слитка			Требования ЦЕРН
	2383-22	2394-22	2403-22	
N	0,0004-0,0011	0,0005-0,001	0,0004-0,0014	0,001
O	0,0011-0,0043	0,0008-0,0012	0,0006-0,0022	0,001
H	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,0002
C	0,00001-0,00146	0,00057-0,00011	0,00002-0,00079	0,001
Zr	<0,004	<0,004	<0,004	0,01
Ta	≤0,008	<0,005	≤0,011	0,05
Fe	<0,003	<0,003	<0,003	0,005
Si	<0,003	<0,003	<0,003	0,005
W	<0,0015	<0,0015	<0,0015	0,007
Ni	<0,001	<0,001	<0,001	0,003
Mo	<0,003	<0,003	<0,003	0,005
Hf	<0,004	<0,004	<0,004	0,005
Ti	<0,003	<0,003	<0,003	0,005
Cr+Co	0,003	0,003	0,003	0,005

Химический состав полученных слитков второй партии соответствовал требованиям по всем примесям за исключением кислорода, по которому на ряде проб есть превышение (до 0,004 вместо требуемых 0,001 масс. %). В дальнейшем было

установлено, что при таком содержании кислорода в слитке разработанные АО «ВНИИНМ» режимы позволяют получить на готовых листах требуемые механические, структурные характеристики и параметр RRR.

На рис. 1 представлена фотография внешнего вида выплавленного ниобиевого слитка диаметром 140 мм и его макроструктура. Характерной особенностью макроструктуры полученных слитков являются крупные зерна размером до 7 см, что косвенно свидетельствует о высокой химической чистоте металла.

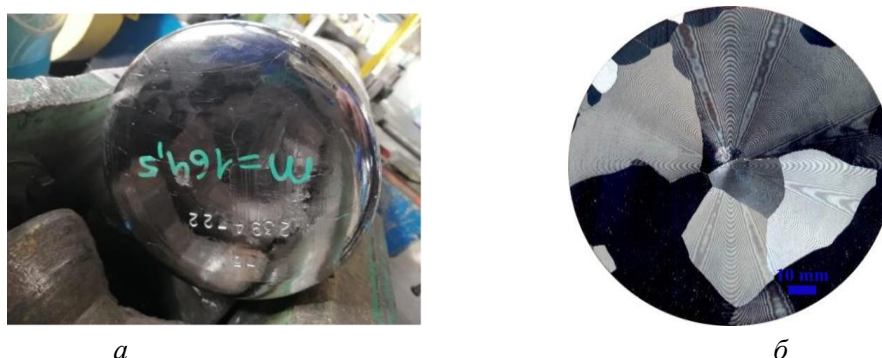


Рис. 1. Общий вид (а) и макроструктура (б) слитка резонаторного ниобия (верхняя часть) диаметром 140 мм после электронно-лучевых переплавов

Таким образом, по результатам выплавки опытной партии слитков ниобия была показана воспроизводимость технологии, разработанной АО «ВНИИНМ». Опытная партия слитков резонаторного ниобия успешно прошла приемочные испытания, были разработаны технологические инструкции и регламенты, аттестованы методики химического анализа и измерения RRR, оформлены ТУ на слитки ниобия резонаторного класса, было принято решение о присвоении технологической документации литеры О₁, оформлен патент [11].

4. Разработка режимов изготовления и выпуск опытной партии ниобиевых листов для сверхпроводящих резонаторов

Поскольку помимо высокого значения параметра RRR (более 300) к ниобиевым листам для резонаторов предъявляются требования по среднему размеру зерна, механическим свойствам, шероховатости поверхности (табл. 1), было необходимо разработать технологические схемы, обеспечивающие достижение требуемых параметров в совокупности. На начальном этапе НИОКР в АО «ВНИИНМ» были разработаны и опробованы маршруты деформации и термообработки, отличающиеся суммарной степенью деформации, методами обработки давлением (осадка, экструзия, прокатка в различных направлениях) и проведением отжигов рекристаллизации на различных стадиях (промежуточные и заключительные). Большое количество экспериментов было посвящено подбору оптимального режима и условий заключительного рекристаллизационного отжига листов. В результате проведенных

экспериментов были построены зависимости механических свойств и размера зерна ниобиевых листов от степени деформации и режимов термообработки [12].

Была выбрана оптимальная технологическая схема, позволяющая получить комплекс требуемых характеристик, в том числе средний размер зерна ≤ 45 мкм и требуемое значение параметра RRR.

В табл. 3 представлены значения параметра RRR и среднего размера зерна листов после рекристаллизационного отжига и параметр RRR слитков, из которых они были изготовлены. Для оценки влияния исходного значения параметра RRR слитков на RRR изготавливаемых из них листов были взяты ниобиевые слитки с различным RRR: слитки марки НББ и НБМ (штатные слитки для производства сверхпроводящих материалов), а также слитки 2073-20, 2063-20, 2093-20, выплавленные в рамках данной работы.

Таблица 3

Значения RRR, среднего размера зерна ниобиевых листов различных партий и RRR исходных слитков

№ партии № листов	№1 (НББ)	№2 (НБМ)	№3 (2073- 20)	№4 (2063- 20)	№5 (2093-20)	Требуемое значение
RRR исходного слитка	94	167	309; 330	406; 453	453; 431	
RRR листа после рекристаллизационного отжига	97	165	265-267	303-364	>370	>300
Средний размер зерна, мкм	41	35	32-37	37-42	34-36	≤ 45

Из представленных данных (табл. 3) видно, что с увеличением параметра RRR исходного ниобиевого слитка также возрастает параметр RRR изготовленных из него листов. Отмечено, что разница между значением параметра RRR на нижней и верхней частях слитков может быть значительной и достигать 47 единиц. Это связано с особенностями структуры и состава, которые формируются в начале и в конце процесса плавки. Начало плавки характеризуется постепенным поднятием мощности с целью прогрева печи, промежуточной ёмкости и затравки; таким образом обеспечивают устойчивую работу электронных пушек в процессе всей плавки. Соответственно, в начальный период плавки еще не созданы оптимальные условия для рафинирования ниобия от примесей, что объясняет более низкие значения параметра RRR на образцах, отобранных от нижних частей слитков. Высокое значение параметра RRR листов из слитка №5 (RRR >370) также обусловлено применением усовершенствованных режимов заключительного рекристаллизационного отжига (НОУ-ХАУ 428/136кТ от 20.12.2022).

Типичная микроструктура сечения листа вдоль направления прокатки после заключительного рекристаллизационного отжига приведена на рис. 2.



Рис. 2. Микроструктура сечения листа партии №209320 вдоль направления финишной прокатки

В результате, в 2022 году по разработанной оптимальной технологической схеме была изготовлена квалификационная партия ниобиевых листов размером 2×200×300 мм в количестве 50 шт. из исходных слитков с параметром RRR более 400. Характеристики квалификационной партии ниобиевых листов представлены в табл. 4. Все листы успешно прошли ультразвуковой контроль, сигналы от неоднородностей не превышали браковочный уровень 29 дБ. Путем ультразвуковых исследований листов контролировали наличие таких дефектов как трещины, расслоения, пленки, инородные включения, которые могли появиться в процессе их технологического передела.

Таблица 4

Характеристики квалификационной партии ниобиевых листов

#	Характеристика	Фактическое значение	Требуемое значение
1	Толщина x ширина x длина, мм	2×200×300	2×200×300
2	RRR	>350	≥300
3	Средний размер зерна, мкм	34-45	≤45
4	Доля рекристаллизованного объема, %	100	100
5	Твердость по Виккерсу HV	45-60	≤60
6	Предел прочности при растяжении, МПа	148-172	≥140
7	Предел текучести, МПа	65-85	65-100
8	Относительное удлинение, %	31-38	≥30
9	Шероховатость поверхности, Rt, мкм	≤10	≤15

Квалификационная партия успешно прошла приемочные испытания с присвоением литеры О. Был выпущен комплект технической документации (технологический регламент, проект технических условий, аттестованные методики измерения параметра RRR и проведения ультразвукового контроля). Внешний вид листов ниобия квалификационной партии представлен на рис. 3.

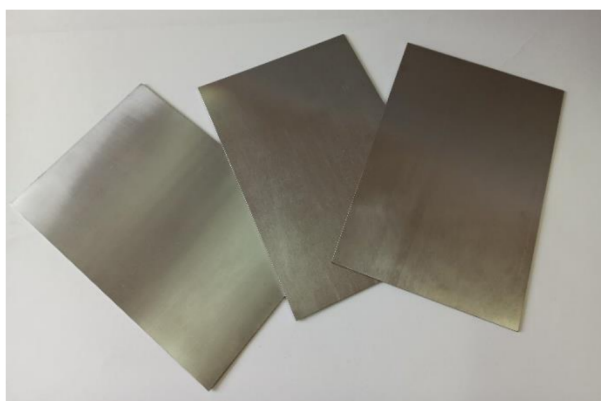


Рис. 3. Внешний вид ниобиевых листов размером 2×200×300 мм квалификационной партии

5. Сопоставительные измерения параметра RRR полученных ниобиевых слитков и листов в АО «ВНИИНМ» и БГУ

Для проведения сопоставительных измерений в АО «ВНИИНМ» были отобраны образцы от слитков и листов ниобия с параметром RRR в широком интервале значений (от 70 до 450) и отправлены в Институт Ядерных Проблем Белорусского Государственного университета (БГУ, г. Минск, Беларусь).

Полученные результаты измерений параметра RRR в АО «ВНИИНМ» и БГУ представлены на рис. 4.

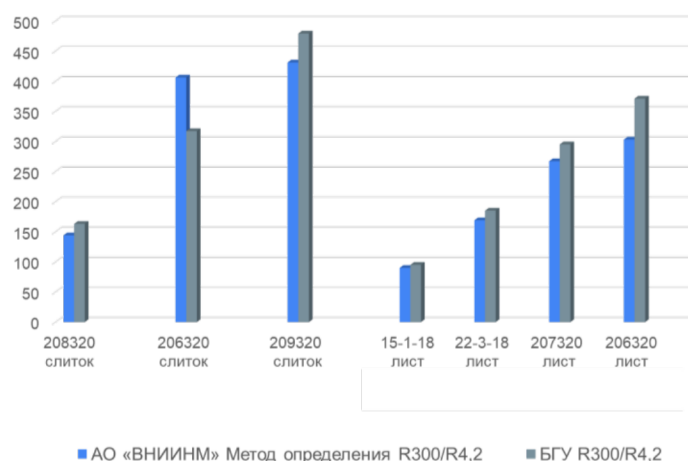


Рис. 4. Результаты сопоставительных измерений параметра RRR образцов ниобиевых слитков и листов в АО «ВНИИНМ» и БГУ

Анализ полученных результатов свидетельствует об их хорошей сходимости. Отмечено, что значения параметра RRR, полученные в БГУ на одних и тех же образцах, имеют на 5-10% большую величину (за исключением одного образца 2063-20), чем в АО «ВНИИНМ». Такое расхождение может быть связано с особенностями конструкции измерительных зондов, различиями в параметрах термостатирования при определении сопротивления при комнатной температуре и др.

Выводы

Специалистами АО «ВНИИНМ» разработаны требования к исходному сырью и режимы ЭЛП слитков ниобия для сверхпроводящих резонаторов с параметром RRR более 400 в промышленных условиях АО ЧМЗ. В 2022 г. выплавлена опытная партия слитков диаметром 135-145 мм, длиной более 400 мм, общей массой 344 кг с параметром $RRR > 450$. Успешно проведены их приемочные испытания. Технологической документации присвоена литера О1, разработаны ТУ, аттестованы методики, получен патент [11].

Изучено влияние характеристик исходных слитков, видов и степени деформации, режимов рекристаллизационного отжига на структурные, механические характеристики, параметр RRR и качество поверхности Nb листов.

Установлены взаимосвязи механических свойств, микроструктуры, параметра RRR ниобиевых листов с режимами деформации и температурой рекристаллизационного отжига. В АО «ВНИИНМ» разработаны режимы изготовления ниобиевых листов для сверхпроводящих резонаторов с $RRR > 300$. В 2022 г. изготовлена партия листов $2 \times 200 \times 300$ мм в количестве 50 шт. с $RRR > 350$, со средним размером зерна 34-45 мкм, $\sigma_B = 148-172$ МПа, $\sigma_{0,2} = 65-85$ МПа, $\delta = 31-38\%$, твердостью $HV_{10/30} = 45-60$, с шероховатостью поверхности $R_t \leq 10$ мкм.

Проведены сопоставительные измерения RRR образцов ниобиевых слитков и листов в АО «ВНИИНМ» и БГУ. Образцы подтвердили сходимость результатов в пределах 10%. Наибольшие расхождения имеют место для диапазона RRR более 300.

В результате НИОКР, проведенной АО «ВНИИНМ» совместно с АО ЧМЗ, в рамках договора с АО «ТВЭЛ» в период 2019-2022 гг., в России создана отечественная опытная технология получения листов из ниобия особой чистоты, соответствующих требованиям ЦЕРН для сверхпроводящих резонаторов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам цеха П-425 АО «ВНИИНМ» и лично Я.С. Краевскому, А.А. Чугину, К.М. Миначеву, сотрудникам цехов 07, 08, 09, 60, СКТО АО ЧМЗ и лично А.Г. Зиганшину, П.Н. Вертячих, Р.С. Коншину, Н.Я. Варкентину, Е.А. Шихову, С.А. Горбушину, Е.Н. Владыкину, С.В. Котову, Р.Р. Касимову, К.А. Токареву.

Авторы статьи выражают особую благодарность Валерию Андреевичу Дробышеву за большой вклад в разработку технологии получения высокочистого ниобия резонаторного класса.

Обеспечение работы

Данная НИОКР выполнена в 2019-2022 гг. при финансовом обеспечении АО «ТВЭЛ».

Список литературы

1. *The commissioning of the European-XFEL linac and its performance / D. Reschke, W. Decking, N. Walker et al // Proc. of 18th Int. Conf. on RF Superconductivity – 2017.*
2. *Cryogenic systems studies for the MINERVA 100 MeV proton SC linac project / O. Kochebina, F. Dieudegard, T. Junquera et al // Proc. of 19th Int. Conf. on RF Superconductivity – P. 918-920.*
3. *The ESS superconducting linear accelerator / C. Darve, P. Bosland, S. Bousson et al // Proc. of SRF2013 – P.77-79.*
4. *The International Linear Collider, Technical Design Report, Vol.3.II: Accelerator Baseline Design, 2013.*
5. *Superconducting cavity material for the European XFEL / W. Singer, X. Singer, A. Brinkmann et al // 2015 Supercond. Sci. Technol. 28 085014.*
6. *Material Specification №3300 - Ed. 4 EDMS N°: 1095252 Pure niobium sheets for superconducting applications RRR 300 grade.*
7. *Development of high purity niobium used in SRF accelerating cavity/ CHEN Lin, XIE Wei-Ping et al/2008/ Chinese Physics C (HEP & NP).*
8. *Superconducting radio-frequency cavities made from medium and low purity niobium ingots //2019*
9. *SRF Cavity Fabrication and Materials/ W. Singer/2015/ DOI: 10.5170/CERN-2014-005.171.*
10. *Development of high purity niobium used in SRF accelerating cavity/ CHEN Lin; XIE Wei-Ping; LI Ming-Yang; HE Ji-Lin; FAN Hui-Ru; ZHANG Bao-Cheng; HE Fei-Si; ZHAO Kui; CHEN Jia-Er; LIU Ke-Xin/ Chinese Physics C (HEP & NP) Vol. 32, №12, Dec., 2008.*
11. *Способ получения слитков ниобия высокой чистоты. Пат. RU2783993C1 Российская Федерация / И.М. Абдюханов, М.В. Алексеев, А.С. Цаплева, М.М. Потапенко, М.В. Кравцова, М.В. Крылова и др.; Заявитель и патентообладатель АО «ТВЭЛ». – №2022113460; заявл. 19.05.2022; опубл. 23.11.2022.*
12. *Mechanical Properties and Structure of High-Purity Niobium Sheets for the Superconducting RF Cavities / Abdyukhanov I.M., Alekseev M.V., Krylova M.V. et al // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022*