

СТРУКТУРА,
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФФУЗИЯ

УДК 669.6'293:621.763

ВЛИЯНИЕ ДИФФУЗИОННОГО ОТЖИГА СВЕРХПРОВОДНИКОВ
НА ОСНОВЕ Nb_3Sn С ВНУТРЕННИМ ИСТОЧНИКОМ ОЛОВА
НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ МЕДИ

© 2021 г. Д. С. Новосилова^а, М. В. Поликарпова^а, И. М. Абдюханов^а, И. Л. Дерягина^{б, *},
Е. Н. Попова^б, Е. И. Патраков^б, А. С. Цаплева^а, М. В. Алексеев^а

^аАО Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов
им. акад. А.А. Бочвара, ул. Рогова, 5а, Москва, 123098 Россия

^бИнститут физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

*e-mail: deryagina@mail.ru

Поступила в редакцию 29.07.2020 г.

После доработки 01.09.2020 г.

Принята к публикации 14.09.2020 г.

Для создания обмоток магнитной системы Будущего Кольцевого Коллайдера требуется модернизация композитных Nb_3Sn сверхпроводников, получаемых методом внутреннего источника олова, в том числе повышение теплопроводности и электропроводности матричной меди, определяемой по величине параметра RRR (Residual Resistance Ratio – отношение значений электросопротивления меди при 273 и 20 К). Достижение высоких значений RRR определяется балансом между геометрическими размерами, объемными долями компонентов сверхпроводника и режимом реакционной термообработки (РТО), проводимой для образования фазы Nb_3Sn . В работе приведено экспериментальное и расчетное исследование влияния диаметра стрендов и режима РТО на параметр RRR. Методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа исследована диффузия олова из зоны субэлементов в стабилизирующую медь во время РТО в стрендах различных диаметров. Исследование проведено на экспериментальных образцах многоволоконных сверхпроводников на основе Nb_3Sn с распределенным Nb-барьером.

Ключевые слова: RRR, Nb_3Sn , многоволоконные сверхпроводники, реакционная термообработка

DOI: 10.31857/S0015323021010095

ВВЕДЕНИЕ

Современные сверхпроводники на основе Nb_3Sn с высокой токонесущей способностью востребованы для создания самого большого ускорителя заряженных частиц – Будущего Кольцевого Коллайдера (Future Circular Collider – FCC). Несмотря на значительный прогресс последних двух лет [1], в настоящее время задача по достижению целевого комплекса свойств сверхпроводников (стрендов) на основе Nb_3Sn остается актуальной. В частности, необходимо обеспечить плотность критического тока J_c выше 1500 А/мм^2 в поле 16 Тл при 4.2 К, относительное остаточное сопротивление (параметр RRR) на уровне не менее 150 единиц и эффективный диаметр $d_{\text{эфф}} < 60 \text{ мкм}$ [2]. Плотность критического тока является одной из важнейших эксплуатационных характеристик многоволоконных сверхпроводников и зависит, в основном, от количества и качества сверхпроводящих слоев Nb_3Sn [3]. Не менее важным является и RRR, высокие значения которого обеспечива-

ют стабильность работы кабеля по отношению к тепловым возмущениям. Значение RRR определяется не только электропроводностью и объемной долей медной составляющей в композиционных сверхпроводниках на основе Nb_3Sn , но и рядом параметров, связанных с технологией их изготовления, одним из которых может стать загрязнение меди при длительных диффузионных отжигах. Деградация RRR после диффузионных отжигов наблюдалась в сверхпроводниках на основе Nb_3Sn , разработанных для магнитной системы ИТЭР (Международного термоядерного экспериментального реактора) и полученных по “бронзовой” технологии как на российских [4], так и на европейских [5] стрендах.

В настоящее время для создания сверхпроводящих стрендов на основе Nb_3Sn по методу внутреннего источника питания в виде олова (ВИП-метод), предназначенных для высокополевых магнитов, предлагаются два типа конструкции сверхпроводников, отличающиеся видом диффузионного барьера. Первый вариант предполагает наличие еди-

ного барьера, отделяющего зону стренда, содержащую группы сверхпроводящих волокон, от внешней стабилизирующей меди. Во втором варианте каждая из групп сверхпроводящих волокон отделена от стабилизирующей меди индивидуальным (распределенным) барьером, образуя диффузионно изолированные от меди субэлементы с центральным расположением источника олова [6]. При этом диаметр кольцевого распределенного Nb-барьера практически равен эффективному диаметру волокна. Установлено, что второй вариант конструкции обеспечивает более высокую токнесущую способность стренда, поскольку при малых размерах отдельных субэлементов (<60 мкм) высокие значения J_c достигаются путем увеличения количества субэлементов в стренде.

Параметр RRR, являющийся мерой чистоты матричной меди, определяется сохранением целостности диффузионных барьеров, которые не допускают диффузии олова из зоны формирования сверхпроводящей фазы. Для каждой конструкции стренда важно определить оптимальный режим диффузионного отжига или реакционной термообработки (РТО), обеспечивающий не только высокую токнесущую способность, но и сохранение достаточно высокого уровня параметра RRR, а также определить критическую толщину барьера, ниже которой происходит деградация параметра RRR. Так, согласно [7] в стрендах, разрабатываемых компанией Bruker-OST, снижение толщины барьера с 6 до 3 мкм приводит к падению RRR со 160 до 20 единиц, а причины такой деградации RRR связаны с разрушением внутренней структуры стренда и утечкой олова в матричную медь.

В настоящей работе рассматривается влияние режимов РТО и диаметра сверхпроводящего стренда на величину RRR на примере разработанного АО ВНИИНМ (Акционерное общество “Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А.А. Бочвара”) оптимизированного сверхпроводника на основе Nb_3Sn со 120 субэлементами. Плотность критического тока данного типа провода при диаметре провода 1 мм и соотношении “медь–к–не-меди” 1.16 составляет 2800 А/мм² в поле 12 Тл и 1100 А/мм² в поле 16 Тл [8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Экспериментальные образцы Nb_3Sn стрендов диаметром 1, 0.7 и 0.5 мм изготовлены на АО ЧМЗ (Акционерное общество “Чепецкий механический завод”) по технологии АО ВНИИНМ. Стренд состоит из 120 субэлементов (рис. 1). В центре каждого субэлемента расположен источник олова, окруженный Nb-волокнами и кольцевым ниобиевым барьером. Конструкция субэлементов по-

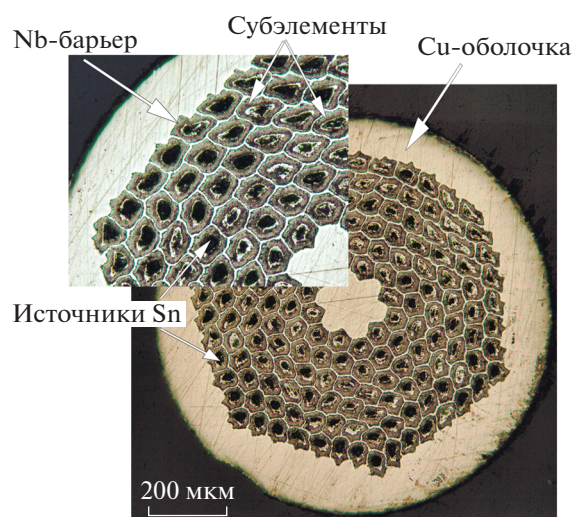


Рис. 1. Поперечное сечение Nb_3Sn стренда $\varnothing 1$ мм до РТО. Число субэлементов – 120.

дробно представлена в [9] на примере стренда с 37 субэлементами. Субэлементы равномерно распределены в медной матрице. Стабилизирующая медь в стрендах данной конструкции включает в себя внешнюю медную оболочку, матричную медь между субэлементами и внутреннюю медь, расположенную в центре стренда. Геометрические размеры структурных составляющих образцов приведены в табл. 1.

Средняя толщина барьера для наибольшего диаметра провода ($\varnothing 1$ мм) составляет около 3 мкм (табл. 1), что в соответствии с [7], уже является критичным для сохранения высоких значений параметра RRR. Учитывая измеренные отклонения толщины барьера от среднего значения в стренде до РТО, видно, что локальная толщина барьера может быть ниже среднего значения в два раза.

Реакционная термообработка образцов провода проведена в лабораторной вакуумной печи с остаточным давлением не более 2×10^{-5} мм рт. ст. с целью формирования соединения Nb_3Sn внутри субэлементов. Термообработка состояла из двух температурных ступеней – 370°C, 100 ч и 665°C разной продолжительности. Двухступенчатая ТО необходима для формирования мелкодисперсной (с минимальным размером зерна) фазы Nb_3Sn при максимально полной проработке Nb-волокон. В данном исследовании мы изучали влияние на параметр RRR длительности (от 1 ч до 100 ч) второй ступени отжига (665°C) стренда диаметром 1 мм и уменьшения диаметра стренда (1, 0.7, 0.5 мм) при фиксированной длительности (40 ч) второй ступени отжига.

Электрическое сопротивление стрендов измеряли четырехконтактным методом по стандартной методике. Относительное остаточное электриче-

Таблица 1. Геометрические параметры Nb₃Sn стрендов до РТО

Параметр	Значение		
	1.0	0.7	0.5
Диаметр провода, мм	1.0	0.7	0.5
Средняя толщина барьера, мкм	2.8	2.0	1.4
Максимальная толщина барьера, мкм	4.1	2.9	2.1
Минимальная толщина барьера, мкм	1.5	1.1	0.8
Размер субэлемента, мкм	57	40	29
Расстояние между субэлементами, мкм	3.2	2.2	1.6
Диаметр источника олова, мкм	27.0	19.0	13.5
Отношение объемных долей Nb к Sn		2.8	
Число субэлементов, шт.		120	

ское сопротивление определяли в соответствии с требованиями стандарта [10] как отношение электрических сопротивлений образца при температурах 273 и 20 К. Установленная погрешность определения RRR не превышала 2%.

Металлографический анализ травленных шлифов поперечных сечений образцов композитов был проведен на оптическом микроскопе “Olympus”. Исследования микроструктуры и состава композитов проводили в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Inspect F (FEI) с приставкой EDAX для рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) в ЦКП ИФМ УрО РАН. Шлифы композитного провода готовили по стандартной технологии заливки образца в сплав Вуда с последующей шлифовкой на наждачном полотне различной зернистости и финальной полировкой на влажном сукне с окисью хрома. Для того чтобы избежать влияния травления на результаты элементного анализа, микроанализ проводили на нетравленном полированном шлифе, поверхность которого очищали спиртом.

Таблица 2. RRR Nb₃Sn стрендов в зависимости от диаметра стренда и длительности второй ступени отжига

Диаметр стренда, мм	Выдержка при 665°С, ч	RRR
1.0	1	224
1.0	10	234
1.0	25	149
1.0	40	106
1.0	60	59
1.0	100	24
0.7	40	22
0.5	40	5

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

Продолжительность второй ступени реакционной термообработки образцов Nb₃Sn стрендов разных диаметров и измеренные значения параметра RRR приведены в табл. 2. Из табл. 2 видно, что для стренда Ø1 мм увеличение длительности отжига от 1 ч до 10 ч не приводит к падению RRR, тогда как дальнейший рост продолжительности отжига вызывает резкое, вплоть до десятикратного (при длительности отжига 100 ч) снижение параметра RRR. Поскольку 10-часовой отжиг не приводит к снижению RRR, данное время можно считать периодом ретардации, т.е. временем, в течение которого Nb-барьер сохраняет свою целостность.

В образцах стрендов различных диаметров (1.0, 0.7 и 0.5 мм), выдержанных на второй ступени отжига в течение 40 ч, уменьшение диаметра провода сопровождается резким снижением параметра RRR (от 106 до 22 и 5, соответственно). Мы полагаем, что такое поведение может быть связано с изменениями внутренней структуры стренда, которые мы наблюдали, анализируя данные оптической микроскопии и СЭМ.

На рис. 2 представлены полученные в оптическом микроскопе изображения фрагментов поперечного сечения образца Nb₃Sn-проводника Ø1 мм после РТО 370°С, 100 ч + 665°С, 40 ч. На этих изображениях слои сверхпроводящей фазы Nb₃Sn, образовавшейся при отжиге, выглядят как темные кольцевые области толщиной 10–15 мкм на фоне светлой медной матрицы. Области Nb-барьера (указаны стрелками) выглядят как светло-серые тонкие кольцевые участки, расположенные между внешней границей сверхпроводящего слоя и матрицей. Видно, что Nb-барьер после РТО с длительностью отжига на второй ступени 40 ч имеет неравномерную толщину. При этом максимальная толщина барьера не превышает 2 мкм, тогда как до отжига максимальная толщина барьера составляла 4.1 мкм (табл. 1). Это свидетель-

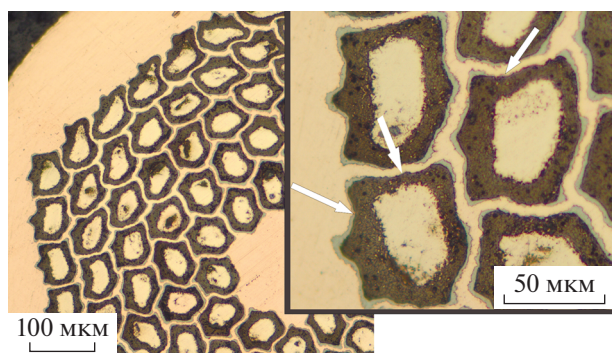


Рис. 2. Фрагменты поперечного сечения Nb_3Sn стренда $\varnothing 1$ мм после РТО $370^\circ C$, 100 ч + $665^\circ C$, 40 ч. Стрелками указан ниобиевый барьер. Оптическая микроскопия.

ствует о том, что при таком режиме РТО атомы олова из источника вследствие термически активированной диффузии провзаимодействовали не только с Nb-волоконками, но и с ниобием барьера. В результате часть барьера превратилась в интерметаллическое соединение и перестала выполнять защитную функцию, создав возможность диффузии олова в медь. В таком случае загрязнение меди оловом вполне может быть причиной, которая приводит к двукратному снижению RRR после отжига с выдержкой 40 ч на второй ступени (табл. 2).

Для проверки этого предположения мы провели исследование методами СЭМ и РСМА структуры образцов различного диаметра (1.0, 0.7 и 0.5 мм) после одинакового времени выдержки 40 ч на второй ступени РТО.

На рис. 3 показаны СЭМ-изображения образца $\varnothing 1$ мм (а, б), карты распределения характеристического излучения Cu, Nb, Sn (в–д), а также изменение интенсивности излучения данных элементов на границе между одним из субэлементов и стабилизирующей медью (е) вдоль заданной линии сканирования. На СЭМ-изображении субэлемента, приведенном на рис. 3б, максимальная толщина барьера составляет 2 мкм (напомним, что это в два раза меньше, чем в композите до отжига, табл. 1), что согласуется с результатами оптической микроскопии, приведенными выше (рис. 2б). Карты распределения элементного состава показывают, что излучение меди (рис. 3в) локализовано в межсубэлементной матрице и в области источника олова, излучение ниобия – внутри сформированного при отжиге слоя Nb_3Sn и в области барьера (рис. 3г). В отличие от излучения меди и ниобия, излучение олова (рис. 3д) присутствует во всех участках этого фрагмента стренда: в слое Nb_3Sn , в источнике олова, в области Nb-барьера и в области стабилизирующей меди. Интенсивность излучения олова максимальна – в

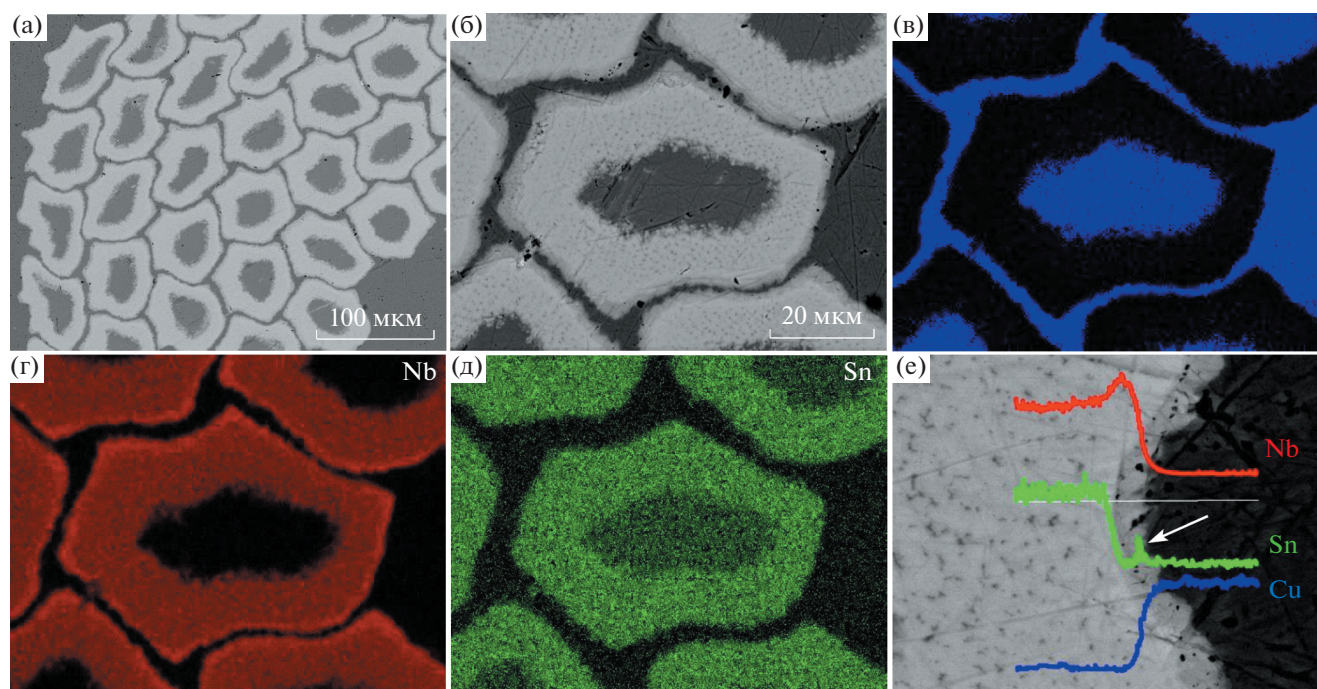


Рис. 3. СЭМ-изображения фрагментов композита $Cu/Nb/Sn$ $\varnothing 1$ мм после отжига $370^\circ C$, 100 ч + $665^\circ C$, 40 ч. Изображения получены в режимах: Z-контраста (а, б), характеристических излучений элементов в виде карты распределения Cu (в), Nb (г), Sn (д) и изменения интенсивности излучений элементов вдоль линии сканирования на границе субэлемент/медная оболочка (е).

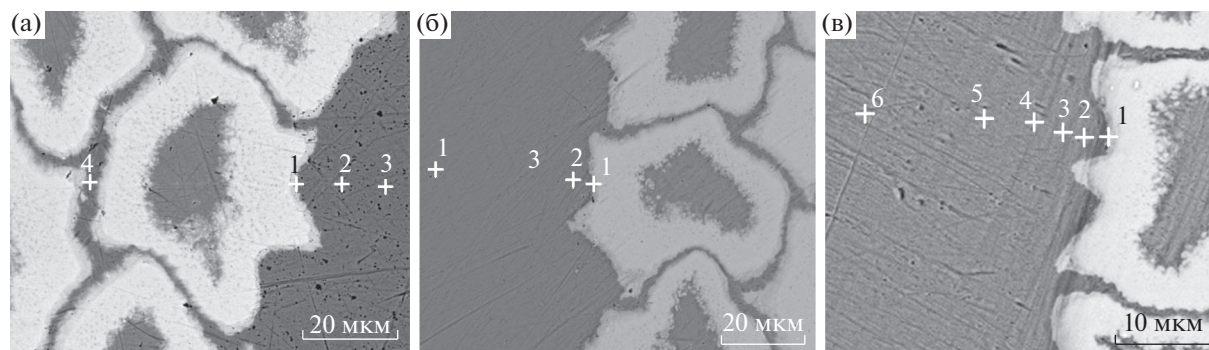


Рис. 4. СЭМ-изображения субэлементов, граничащих со стабилизирующей медью (Cu-оболочка), в образцах $\varnothing 1.0$ мм (а), $\varnothing 0.7$ мм (б) и $\varnothing 0.5$ мм (в) после отжига 370°C , 100 ч + 665°C , 40 ч. Перекрестиями отмечены точки локального микроанализа, результаты которого приведены в табл. 3.

медной матрице. Тем не менее мы видим явные признаки диффузии олова в область Nb-барьера и стабилизирующую медь.

Небольшой пик в интенсивности излучения олова в области Nb-барьера (указан стрелкой на рис. 3е) при сканировании вдоль линии, проходящей через границу субэлемента с медной оболоч-

кой, также демонстрирует наличие олова в Nb-барьере. Согласно результатам микроанализа (центры зон микроанализа отмечены на рис. 4а) в медной матрице между субэлементами образца диаметром 1 мм концентрация олова после отжига составляет 1.9 мас. %, в барьере субэлемента, граничащего с медной оболочкой, – 1.2 мас. %, а в медной оболочке на расстоянии 10 мкм от барьера – 0.5 мас. % (табл. 3). Микроанализ состава Nb-барьеров и медной оболочки был проведен на двух стрендах меньшего диаметра (0.7 и 0.5 мм) с такой же РТО.

Таблица 3. Результаты микроанализа стрендов Nb_3Sn после РТО 370°C , 100 ч + 665°C , 40 ч

\varnothing , мм	№ точки анализа	Cu, мас. %	Nb, мас. %	Sn, мас. %	L, мкм
1.0	1	*	93.6	1.2	0
	2	98.3	**	0.5	10
	3	99.6	*	*	20
	4	97.3	**	1.9	1
0.7	1	**	73.1	2.3	0
	2	99.6	*	0.4	5.0
	3	99.4	*	0.3	10
	4	99.5	*	0.3	40
	5	99.6	*	*	50
0.5	1	**	84.6	6.1	0
	2	97.8	**	1.4	2.5
	3	97.7	**	1.8	5.0
	4	98.2	*	1.6	10
	5	98.1	*	1.5	12.5
	6	98.6	*	1.1	30

L – расстояние от Nb-барьера до центра зоны локального микроанализа; * – результаты находятся на уровне фона (не более 0.2%) или ** – присутствуют в данных анализа вследствие рассеяния электронного пучка.

Данные микроанализа образцов $\varnothing 0.7$ мм и $\varnothing 0.5$ мм приведены в табл. 3, а зоны микроанализа указаны на рис. 4б и 4в. Результаты РСМА показывают, что концентрация олова в зоне Nb-барьера и в прилегающей к барьеру меди нарастает с уменьшением диаметра стренда, достигая 6 мас. % в барьере в образце $\varnothing 0.5$ мм. Концентрация олова в медной оболочке на расстоянии 10 мкм от барьера в стренде $\varnothing 0.5$ мм в два раза выше, чем в стренде $\varnothing 1$ мм. Отметим, что в связи с низкой концентрацией олова в анализируемых участках ($\text{Sn} < 2$ мас. %) точность количественного анализа, получаемого методом РСМА без эталона, невелика (± 0.2 мас. %). Однако качественный анализ достоверно показывает наличие олова в стабилизирующей меди после РТО во всех образцах. При этом в образце $\varnothing 1$ мм на расстоянии 20 мкм от барьера присутствие олова методом РСМА не зафиксировано (интенсивность излучения олова в этой области не превышает уровень фона), а в образце $\varnothing 0.5$ мм олово определяется даже на расстоянии 30 мкм от барьера, что свидетельствует о росте глубины диффузионного проникновения олова через барьер с уменьшением диаметра стренда. Этот результат можно объяснить тем, что в начале отжига градиент концентрации олова на границе источник олова/Nb-волокна одинаков в образцах различных диаметров (концентрация олова в источниках, также как и соотношение

объемных долей Nb/Sn, равное 2,8, одинакова для всех образцов, табл. 1), а диаметр субэлементов и, соответственно, входящих в них Nb-волокон, так же, как и толщина барьера уменьшаются в 1,4–2 раза при уменьшении диаметра стренда от 1 до 0,7 и 0,5 мм соответственно (табл. 1). В результате во время отжига в стренде меньшего диаметра Nb-волокна быстрее насыщаются оловом, необходимым для формирования в них слоев Nb₃Sn, а незадействованное в формировании слоев олово из источника диффундирует к области барьера и взаимодействует с ним более активно, чем в стренде большего диаметра. Действительно, согласно измерениям толщины барьера на СЭМ-изображениях этих стрендов после РТО средняя толщина барьера в образцах диаметром 1,0, 0,7 и 0,5 мм составляет 2,0, 1,3 и 0,7 мкм соответственно, что свидетельствует об уменьшении толщины барьера на 30, 35 и 50% от его исходной величины до отжига. С учетом того, что в стренде Ø0,5 мм толщина барьера в исходном состоянии (до отжига) минимальна по сравнению с остальными образцами, а снижение толщины барьера при отжиге максимально, можно говорить о том, что этот образец наиболее уязвим с точки зрения сохранения параметра RRR. Именно вследствие активной диффузии олова через истонченный барьер (<1 мкм) и максимального “загрязнения” оловом медной оболочки (>1 мас. % Sn на расстоянии 30 мкм от барьера) деградация RRR в стренде Ø0,5 мм максимальна (табл. 1).

Ранее [11] нами был определен коэффициент диффузии олова при температуре 665°C ($D = 2,2 \times 10^{-11}$ см²/с) в медную матрицу на стренде с распределенным Nb-барьером и 37 субэлементами, конструкция которого приведена в работе [6]. С увеличением продолжительности отжига, концентрация олова в медной оболочке может быть выражена уравнением Фика:

$$C(x, t) = C_0 \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \right) \right], \quad (1)$$

где C_0 – концентрация олова по границе сверхпроводящей сердцевинки (вблизи крайних субэлементов); x – глубина проникновения олова в медную оболочку от крайних субэлементов. D и t – коэффициент и время диффузии.

Для описания изменения концентрации олова по границе сверхпроводящей сердцевинки (C_0) использовалась сигмоидальная функция:

$$C_0 = C_{\max} - \frac{C_{\max}}{1 + \exp \left(\frac{t - t_0}{k} \right)}, \quad (2)$$

где C_{\max} определено пределом растворимости олова в меди при температуре второй ступени РТО, t_0 – период ретардации, k – масштабный коэффициент. Подбор коэффициентов (t_0 и k) про-

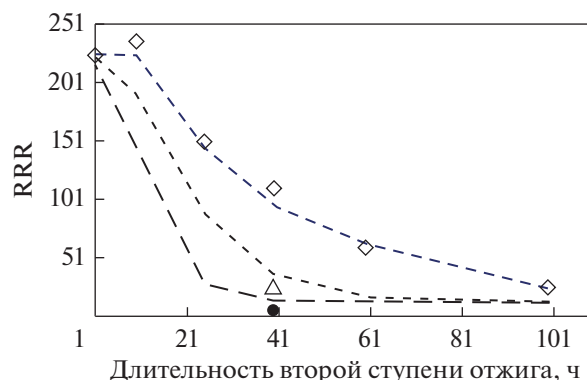


Рис. 5. Зависимости RRR от длительности второй ступени РТО при 665°C. Расчетные кривые обозначены пунктиром. Экспериментальные точки: \diamond – стренд Ø1 мм, \triangle – стренд Ø0,7 мм, \bullet – стренд Ø0,5 мм.

водился с использованием данных микроанализа по концентрации олова на границе раздела внешнего ряда субэлементов и матричной меди.

Увеличение глубины проникновения олова (x) приводит к распределению атомов Sn в медной оболочке и, как следствие, увеличению остаточного сопротивления меди, которое может быть выражено как

$$\rho(x)_{\text{ост}} = \rho_{\text{ост}} + \Delta\rho C(x, t), \quad (3)$$

где $\rho_{\text{ост}}$ – остаточное удельное сопротивление исходной меди (свободной от примеси олова), которое определяется при температуре <10 К (при отсутствии тепловых колебаний решетки); $\Delta\rho$ – прирост удельного сопротивления меди при растворении 1 ат. % Sn, равный 2,88 мкОм × см/ат. % [12]; $C(x, t)$ – концентрация олова в зависимости от глубины проникновения и времени выдержки. Профиль $\rho(x)_{\text{ост}}$ распределения олова по глубине (x) медной оболочки определяет набор локальных значений параметра $RRR_{\text{лок}}$:

$$RRR_{\text{лок}} = \frac{\rho_i + \rho(x)_{\text{ост}}}{\rho(x)_{\text{ост}}}, \quad (4)$$

где ρ_i – удельное электрическое сопротивление идеальной меди при температуре 273 К, равное 1,56 мкОм см.

Интегрирование уравнения (4) по x , величина которого определяет долю медной оболочки с определенным значением параметра $RRR_{\text{лок}}$, позволяет получить профиль расчетных значений RRR в зависимости от продолжительности отжига (рис. 5). Из графика следует, что для данной конструкции стренда диаметром 1 мм значение параметра RRR более 150 единиц достигается при ограничении продолжительности отжига 25 ч.

Для проводов малого диаметра расчетные значения RRR превышают измеренные, что может быть связано как с отсутствием периода ретарда-

ции, так и с увеличением электрического сопротивления в субэлементной и центральной зоне за счет диффузионных процессов. Поэтому при проектировании стрендов диаметром менее 1 мм следует увеличить толщину диффузионных барьеров до 3 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диффузии олова при отжиге ниобиевые барьеры вокруг сверхпроводящих субэлементов в ВИП-стрендах с распределенным Nb-барьером претерпевают качественные изменения и частично теряют свои защитные свойства. После отжига 370°C, 100 ч + 665°C, 40 ч в зоне Nb-барьера присутствует олово, концентрация которого увеличивается с уменьшением диаметра стренда. В результате взаимодействия Sn с Nb часть барьера превращается в соединение Nb₃Sn, что приводит к уменьшению толщины барьера относительно его толщины до отжига. Снижение толщины барьера в процессе отжига до 2 мкм и менее делает его проницаемым для диффузии олова из сверхпроводящей зоны в зону стабилизирующей меди. При уменьшении диаметра стренда и, соответственно, поперечных размеров структурных составляющих, происходит резкое снижение параметра RRR, связанное с усилением диффузионных процессов и загрязнением стабилизирующей меди оловом.

Расчет изменения параметра RRR в зависимости от длительности второй ступени отжига показал, что для данной конструкции стренда при температуре второй ступени отжига 665°C значение параметра RRR > 150 при диаметре стренда 1 мм достигается при ограничении продолжительности отжига на второй ступени 25 ч.

Работа выполнена на экспериментальных образцах АО ВНИИНМ, изготовленных на АО ЧМЗ. Режимы отжигов разработаны в АО ВНИИНМ. Отжиги и измерения параметра RRR проведены в АО ВНИИНМ. СЭМ-исследования проведены на оборудовании ЦКП ИФМ УрО РАН, в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема “Давление” № АААА-А18-118020190104-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ballarino A., C. Hopkins S.C., Bordini B., Richter D., Tommasini D., Bottura L. Benedikt M., Sugano M., Ogitsu T., Kawashima S., Saito K., Fukumoto Y., Sakamoto H., Shimizu H., Pantsyrny V., Abdyukhanov I., Shlyakov M., Zernov S., Buta F., Senatore C., Shin I., Kim J., Lachmann J., Leineweber A., Pfeiffer S., Baumgartner Th. Eisterer M., Bernardi J., Malagoli A., Braccini V., Vignolo M., CNR-SPIN, Putti M., Ferdighini C. The CERN FCC Conductor Development Program: A Worldwide Effort for the Future Generation of High-Field Magnets //* IEEE Trans. Appl. Supercond. 2019. V. 29. № 5. P. 1–9. Art no. 6001709.
2. *Ballarino A., Bottura L. Targets for R&D on Nb₃Sn Conductor for High Energy Physics // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. V. 25. № 3. Art. Numb. 6000906.*
3. *Попова Е.Н., Дерягина И.Л. Оптимизация микро-структуры слоев Nb₃Sn в сверхпроводящих компози-тах // ФММ. 2018. Т. 119. № 12. С. 1290–1296.*
4. *Новосилова Д.С., Абдюханов И.М., Воробьева А.Е., Дергунова Е.А., Поликарпова М.В., Мареев К.А., Трактирникова Н.В., Попова Е.Н., Дерягина И.Л., Сударева С.В. Влияние диффузионного отжига на остаточное электросопротивление хромирован-ных стрендов на основе Nb₃Sn, полученных по бронзовой технологии // ФММ. 2012. Т. 113. № 10. С. 1008–1013.*
5. *Alknes P., Bordini B., Bartova B., Izquierdo G.A., Cantoni M., Devred A., Vostner A., Ballarino A., Bottura L. Degradation of the Cu Residual Resistivity Ratio in Cr-Plated Composite Nb₃Sn Wires // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. V. 25. Art. Numb. 7038153.*
6. *Lukyanov P., Pantsyrny V., Polikarpova M., Guryev V., Novosilova D., Bazaleeva K., Tsapleva A., Alekseev M., Silaev A., Abdyukhanov I., Sergeev V. The comparative study of the Internal Tin Nb₃Sn wires with different lay- outs // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1559. Art. Numb. 012061.*
7. *Barzi E. and Zlobin A.V. Nb₃Sn wires and cables for high-field accelerator magnets / Chapter from the book edited by D. Schoerling. Nb₃Sn accelerator magnets. Designs, Technologies and Performance. Springer Open, Switzerland, 2019. P. 23–53. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16118-7_2*
8. *Цаплева А.С., Абдюханов И.М., Базалеева К.О., Александрова А.А., Алексеев М.В. Текстура Nb-во-локон и фазы Nb₃Sn в технических сверхпровод-никах, изготовленных по бронзовой технологии и методом внутреннего источника олова // ФММ. 2020. Т. 121. № 5. С. 522–527.*
9. *Abdyukhanov I., Pantsyrny V., Tsapleva A., Lukyanov P., Konovalova N., Mareev K., Novosilova D., Drobyshev V., Kravtsova M., Krylova M., Savel'ev I., Potapenko M., Alekseev M., Silaev A., S. M. Zernov., Shljahov M. J., Eseneev A.V., Kropachev A.S. Superconducting prop-erties of Nb₃Sn superconductors doped with Ti, Zr and Ti, Ti and Ta // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2020. V. 30(4) Art. Numb. 19621359.*
10. *МЭК(IEC)61788-11 Residual Resistance Ratio mea- surement – Residual Resistance Ratio of Nb₃Sn com-posite superconductors. 2011. <https://gostperevod.ru/st-iec-61788-11-2003.html>.*
11. *Новосилова Д.С., Поликарпова М.В., Лукьянов П.А., Крылова М.В., Цаплева А.С., Алексеев М.В., Абдюха-нов И.М., Панцырный В.И. Влияние режимов тер-мообработка на параметр RRR Nb₃Sn стрендов с внутренним источником олова // ВАНТ. Материа-ловедение. 2018. № 2. С. 48–61.*
12. *Linde J. An Experimental study of the resistivity-con- centration dependence of alloys // Helv. Phys. Acta. 1968. V. 41. P. 1007–1015.*