

УДК 539.25:[538.955:669.293'6]

EDN LQZKQO

Исследование микроструктуры и свойств Nb_3Sn сверхпроводников с повышенным до 16 мас. % содержанием Sn в бронзовой матрице

Н.В. Коновалова, И.М. Абдюханов, Е.А. Дергунова
АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва
NViKonovalova@bochvar.ru

Сверхпроводники на основе соединения Nb_3Sn , изготовленные по бронзовому методу, являются лучшими кандидатами для создания сильных магнитных полей, работающих в постоянном режиме. Увеличение токонесущей способности стрендов (единичных проводников) может быть достигнуто при использовании бронзы с повышенным содержанием олова. Проведен анализ влияния содержания Sn в бронзовой матрице образцов стрендов диаметром 1 мм, разработанных в АО «ВНИИНМ», на морфологию зеренной структуры сверхпроводящего слоя и их токонесущую способность. Показано, что увеличение содержания Sn от 14 до 16 мас. % приводит к росту доли равноосных зерен, за счет снижения доли столбчатых зерен, в Nb_3Sn слое и уменьшению доли остаточного ниобия (на ~12 %) в сверхпроводящем волокне. Это привело к повышению плотности критического тока стрендов (на 15 % в 12 Тл при 4,2 К) по сравнению с изготовленными ранее для магнитной системы ИТЭР.

Ключевые слова: сверхпроводник, стренд, Nb_3Sn , микроструктура, бронза, Osprey-технология

Investigation of microstructure and properties of Nb_3Sn superconductor with up to 16 wt. % Sn increased content in bronze matrix

N.V. Konovalova, I. M. Abdyukhanov, E.A. Dergunova
JSC «A. A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials», Moscow
NViKonovalova@bochvar.ru

Superconductors based on the Nb_3Sn compound, manufactured using a bronze method, are the best candidates for creating strong magnetic fields that operate in a constant mode. Increasing the current-carrying capacity of strands (individual conductors) can be achieved by using bronze with a higher tin content. The analysis of the Sn content effect in the bronze matrix of 1 mm strand samples developed at JSC VNIIPM on the grain structure morphology of the superconducting layer and their current-carrying capacity has been performed. It has been shown that an increase in the Sn content from 14 to 16 wt. % leads to an increase in the proportion of equated grains, due to a decrease in the proportion of columnar grains, in the Nb_3Sn layer, and a decrease in the proportion of residual niobium (by ~12 %) in the superconducting filament. This has led to an increase in the critical current density of the strands (by 15 %, at 12 T and 4.2 K) compared to those previously produced for the ITER magnetic system.

Key words: superconductor, strand, Nb_3Sn , microstructure, bronze, Osprey technology

Введение

Сверхпроводники на основе соединения Nb_3Sn (стренды) представляют собой ключевой материал для создания высокопольных магнитных систем. Они успешно применяются в ускорителях, ЯМР и МРТ магнитах, а также в установках термоядерного синтеза, что под-

тверждается как их промышленным производством, так и использованием их в масштабных международных проектах.

Nb_3Sn сверхпроводники способны работать в магнитных полях вплоть до ~20 Тл, что значительно превышает возможности более распространенного сверхпроводника на основе сплава Nb-Ti (до 9-11 Тл). Это позволяет

создавать более мощные магниты для ускорителей частиц. Также Nb_3Sn сверхпроводники применяются для создания магнитов с сильным полем, что улучшает разрешающую способность и чувствительность ЯМР и МРТ установок. Благодаря высокой критической плотности тока и стабильности в высоких магнитных полях они позволяют создавать компактные и эффективные магнитные системы для медицинской и научной диагностики. Потребности в Nb_3Sn сверхпроводниках существуют и для создания магнитных систем термоядерных реакторов. Дюжина термоядерных устройств была построена или находится в стадии строительства с использованием сверхпроводящих магнитов, например EAST, WEST, KSTAR, JT-60SA и ITER [1-6]. Сверхпроводники на основе Nb_3Sn в оболочке из алюминиевого сплава были предложены в качестве кандидата на изготовление магнитной системы для реактора типа LHD FFHR [7]. На сегодняшний день все чаще рассматривается схема гибридной конструкции магнита, которая является оптимальным решением для производства магнитов с сильным магнитным полем. Например, гибридная магнитная система HTS- Nb_3Sn -NbTi была разработана для EU DEMO CS [8].

Одним из наиболее промышленно освоенных методов получения сверхпроводников на основе соединения Nb_3Sn является так называемый бронзовый метод. Он заключается в прессовании и последующем волочении до требуемого диаметра ниобиевых прутков, размещенных специальным образом в бронзовой матрице. Готовые стренды подвергают реакционной термообработке (РТО) для формирования сверхпроводящей фазы Nb_3Sn . Такие стренды имеют плотность критического тока (J_c) около 700 A/mm^2 во внешнем магнитном поле

12 Тл при температуре 4,2 К. На J_c влияет несколько факторов, такие как: содержание Sn в бронзовой матрице, доля Nb волокон и их размер, режим РТО, а также легирование как бронзовой матрицы, так и ниобиевых волокон.

Известно [9], что одним из наиболее эффективных способов повышения плотности критического тока (J_c) является увеличение количества сверхпроводящей фазы Nb_3Sn и измельчение ее структуры. Этого можно достичь путем повышения содержания Sn в бронзовой матрице, что приведет к образованию большего количества Nb_3Sn . Однако при этом ухудшаются пластические характеристики бронзы, что усложняет ее деформирование в составе композита [10].

Это приводит к необходимости разработки способов получения высоколегированной бронзы с улучшенной структурой, способной к пластической деформации, а также технологических режимов изготовления композиционных полуфабрикатов на ее основе [10].

1. Используемые материалы и методы исследования

В АО «ВНИИНМ» были изготовлены две партии экспериментальных стрендов на основе Nb_3Sn по бронзовому методу диаметром 1 мм. В качестве материала матрицы использовали бронзу, полученную по Osprey-технологии, состава: Cu – 16 мас. % Sn - 0,3 мас. % Ti. Конструкция стрендов включала в себя следующие элементы: композитные прутки CuSn(Ti)/Nb, медный чехол, ниобиевый барьер, бронзовые и композитные заполнители для увеличения плотности сборки (рис. 1). Основные конструкционные параметры элементов стренда приведены в таблице 1.



Рис. 1. Общий вид и фрагмент поперечного сечения стренда ДМ1,0

Таблица 1

| Конструкционные параметры образцов стрендов | | |
|---------------------------------------------|-----------------------------------|---------|
| Партия | ДМ 1 | ДМ1,5 |
| Количество сдвоенных волокон | 19863 | 39132 |
| Состав бронзовой матрицы | Cu – 16 мас. % Sn - 0,3 мас. % Ti | |
| КЗ по ниобию (расчетный), % | 31,5 | |
| Диаметр волокна в стренде диаметром 1 мм | 2,0 мкм | 1,5 мкм |

Образцы подвергали РТО для формирования сверхпроводящей Nb_3Sn фазы по режимам: 575 °С, 100 ч и 575°С, 100 ч+650 °С, 100 ч в вакууме с остаточным давлением не выше 5×10^5 мм рт. ст.

Микроструктуру поперечных сечений образцов до и после РТО исследовали на металлографических шлифах с помощью инвертируемого оптического микроскопа Leica DMI8A в светлом поле в интервале увеличений от 100 до 1000 крат.

Для исследования структуры Nb_3Sn слоя применяли методы сканирующей электронной микроскопии с использованием электронного микроскопа Jeol JSM-7401 F. В работе проводили расчет размеров зерен и статистическую обработку результатов. Для этого использовали изображения изломов образцов, которые обрабатывали в графическом редакторе с применением метода случайных секущих.

Средний размер зерна d_m рассчитывали по формуле:

$$d_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{m_i}, \quad (1)$$

где l_i – длина секущей, мкм;

m_i – количество пересечений границ зерен секущей, ед. (не менее 10);

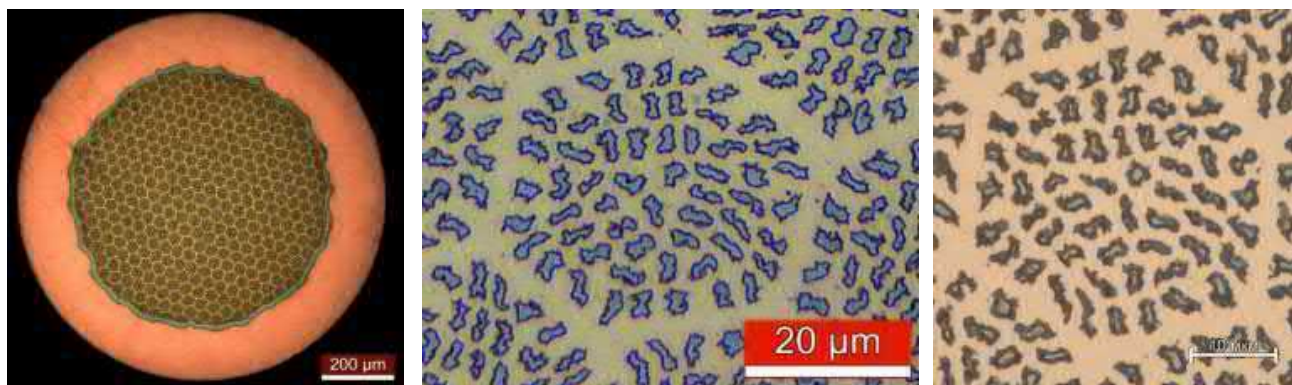
n – количество секущих, ед. (не менее 10).

Перед проведением РТО образцы стрендов для измерения критического тока монтировали на специальные цилиндрические оправки диаметром 32 мм типа VAMAS. Критический ток образцов после РТО определяли в соответствии с рекомендациями стандарта IEC МЭК 61788-2 по измеренным вольт-амперным характеристикам во внешнем магнитном поле 12 Тл по критерию электрического поля 0,1 мкВ/см с погрешностью не более 2%. Плотность критического тока (J_c) определяли с учетом соотношения параметра $Cu/nob\ Cu$, погрешность определения которого также составляла ~ 2%.

2. Результаты исследований и их обсуждение

2.1 Исследование микроструктуры

Проведено исследование микроструктуры поперечного сечения образцов двух партий ДМ1 и ДМ1,5 диаметром 1 мм (рис. 2 и 3). Отмечено, что форма и целостность волокон в них отличаются. Так, на образцах ДМ1 наблюдается более высокое качество волокон, что связано с их большим размером (~2 мкм по сравнению с 1,5 мкм в партии ДМ1,5).

а) Общий вид на \varnothing 1 мм

б) до РТО

в) РТО по режиму: 575 °С,
100ч+650 °С, 100ч

Рис. 2. Общий вид и фрагменты поперечного сечения образцов от партии ДМ1,0

На рис. 3 представлена структура поперечного сечения образцов партии ДМ1,5.

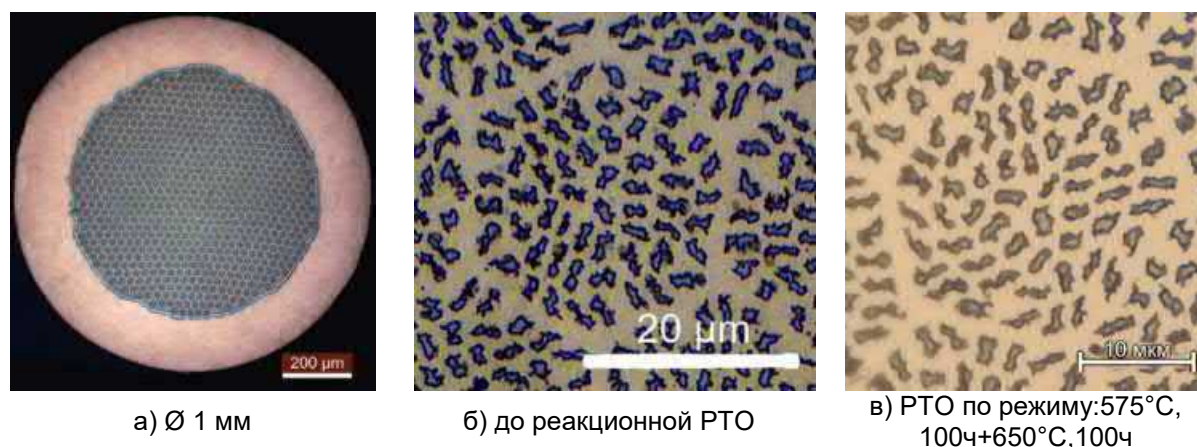


Рис. 3. Общий вид и фрагменты поперечного сечения образцов от партии ДМ1,5

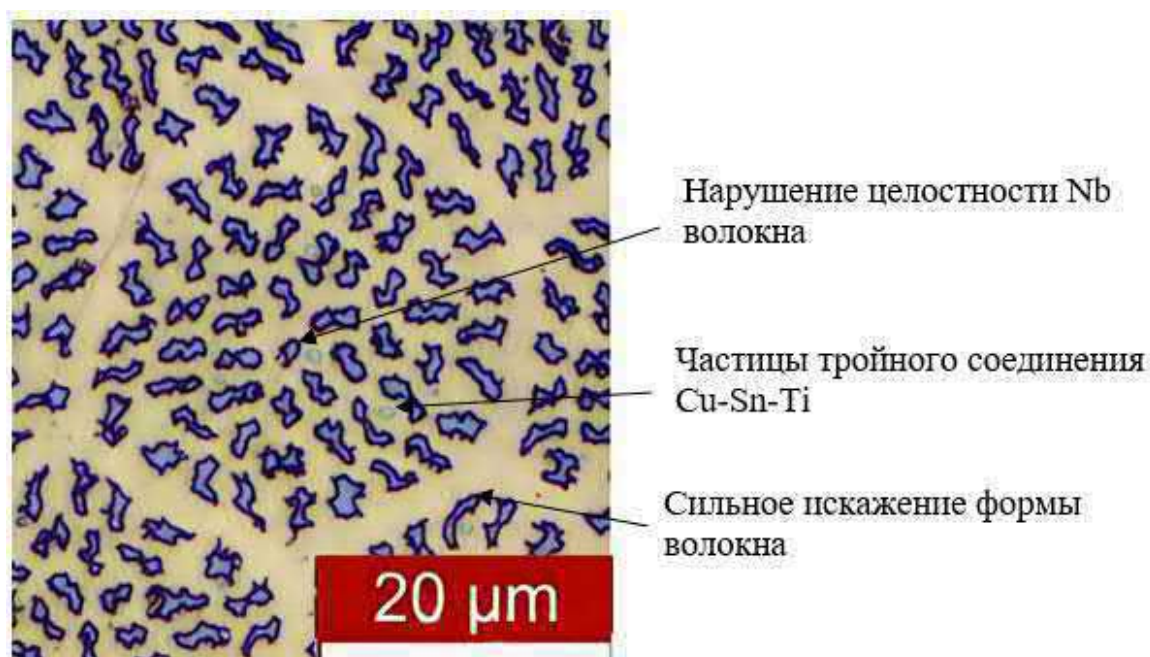


Рис. 4. Фрагмент структуры поперечного сечения образца ДМ1,5 на \varnothing 1 мм

Как видно на рис. 3, на образцах партии с меньшим размером волокон ($\sim 1,5$ мкм) наблюдается значительная разнородность, отмечены искажения формы волокон и нарушения их целостности.

При большем увеличении (рис. 4) видно, что в бронзовой матрице присутствуют частицы тройного соединения Cu-Sn-Ti, которые имеют средний размер ~ 1 мкм. Они могут быть причиной искажения формы волокон, а в некоторых случаях перерезают их.

В результате проведенных исследований

было установлено, что при расчете конструкции Nb₃Sn стрендов с использованием бронзы с повышенным содержанием Sn (16 мас.%) и легированной Ti (0,3 мас. %) необходимо учитывать, что диаметр волокна на финальном размере стренда не должен быть менее 2 мкм.

Образцы полученных проводников подвергали ПТО для формирования сверхпроводящей Nb₃Sn фазы по режимам: 575 °C, 100 ч и 575°C, 100 ч+650 °C, 100 ч. Геометрические параметры конструкции стрендов в исходном и отожженном состояниях приведены в таблице 2.

Таблица 2

Геометрические параметры конструкции стрендов ДМ 1 и ДМ 1,5 на \varnothing 1 мм

| Параметры | В исходном состоянии | | После термообработки 575°C, 100ч | | После термообработки 575°C, 100ч+650°C, 100ч | |
|----------------------------------------|----------------------|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------------------|-----------|
| | ДМ 1 | ДМ 1,5 | ДМ 1 | ДМ 1,5 | ДМ 1 | ДМ 1,5 |
| Диаметр волокна, мкм | 2,3±0,3 | 1,40±0,2 | 3,6±0,4 | 2,20±0,3 | 3,7±0,2 | 2,25±0,15 |
| Расстояние между волокнами, мкм | 1,95±0,15 | 1,10±0,10 | 1,45±0,15 | 0,90±0,10 | 1,30±0,10 | 0,75±0,10 |
| Расстояние между группами волокон, мкм | 3,65±0,15 | 2,40±0,15 | 2,95±0,2 | 1,90±0,15 | 2,75±0,2 | 1,80±0,15 |

Анализ результатов измерений, представленных в таблице 2, показал, что после РТО диаметр волокон увеличился в ~1,5 раза, при этом межволоконные и межгрупповые расстояния несколько уменьшились, что связано с большим удельным объемом сверхпроводящей фазы по отношению к исходному ниобию. Кроме того, отмечено, что в образцах с большим количеством волокон меньшего размера (ДМ1,5) межволоконные расстояния уменьшились (< 1 мкм), что может приводить к «эффекту близости» волокон, т.е. ток может переходить из одного волокна в другое. При этом стренд теряет динамическую устойчивость, что может приводить к срыву потока [11].

2.2 Исследование микроструктуры Nb₃Sn слоя

Проведено исследование зеренной структуры Nb₃Sn образцов ДМ1 и ДМ1,5 после различных режимов РТО (рис. 5).

Выявлено, что слой Nb₃Sn состоит из двух концентрических зон, отличающихся формой зерен: столбчатые и равноосные. В зоне равноосных зерен, на границе с бронзовой матрицей, наблюдается разброс по размерам: от мелких в середине до крупных зерен вблизи бронзовой матрицы. Зона столбчатых зерен примыкает к остаточному ниобию. Во время РТО атомы олова из бронзовой матрицы диффундируют через границы зерен к ниобию. На начальной стадии РТО, когда градиент концентрации

олова максимален, происходит образование первичного слоя столбчатых зерен, ориентированных в направлении роста вглубь ниобиевого волокна. По мере утолщения слоя Nb₃Sn рост столбчатых зерен сопровождается значительными внутренними напряжениями, обусловленными объемными и структурными изменениями при фазовом превращении. Эти напряжения стимулируют образование и миграцию дислокаций, преимущественно в приграничных областях столбчатых зерен [12]. При достижении критической плотности дефектов происходит их полигонизация с последующей рекристаллизацией, в результате которой крупные столбчатые зерна трансформируются в зону мелких равноосных зерен. По мере продолжения РТО мелкие зерна постепенно укрупняются. Наиболее интенсивно этот процесс протекает вблизи бронзовой матрицы. В результате на границе с бронзой формируются крупные зерна, тогда как в глубине слоя они остаются значительно мельче. Поскольку границы зерен в Nb₃Sn служат основными центрами пиннинга магнитных вихрей, высокая плотность равноосных зерен обеспечивает максимальную эффективность их закрепления. Это непосредственно повышает критическую плотность тока (J_c) в сверхпроводниках [13].

Для сравнения была изучена микроструктура сверхпроводящих слоев в образцах Nb₃Sn стренда для ИТЭР с меньшим содержанием олова в бронзовой матрице [14] и ДМ 1,0, ДМ1,5 разных диаметров после РТО (рис. 6 и 7).

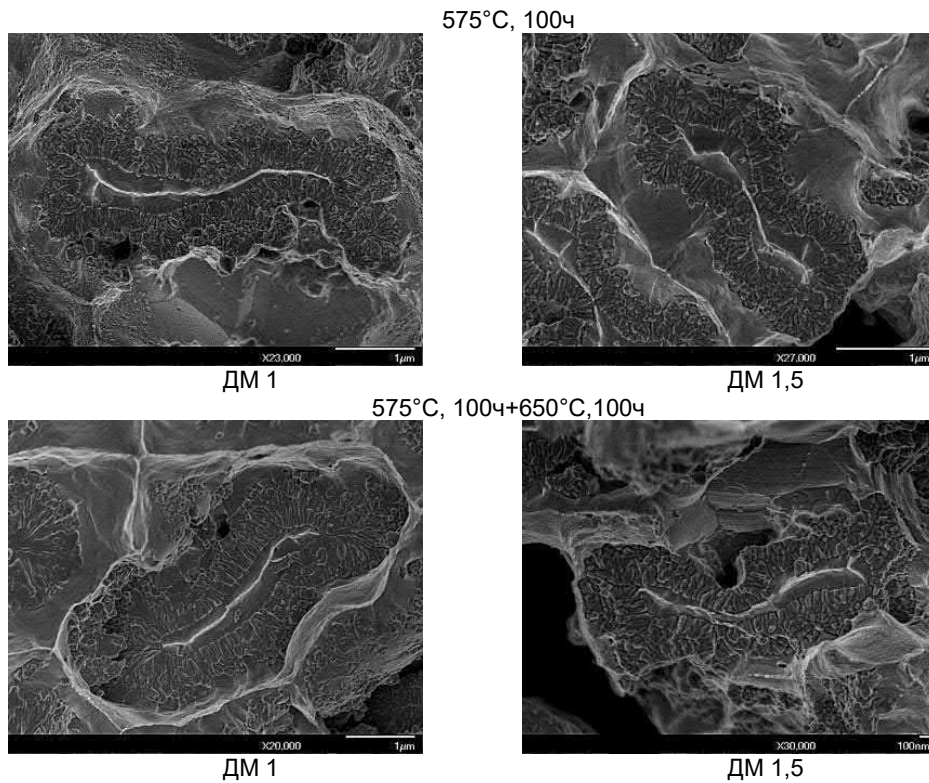


Рис. 5. Фрагменты микроструктуры поверхности излома образцов Nb_3Sn стренда \varnothing 1 мм ДМ1,0 и ДМ1,5 после различных РТО, (РЭМ)

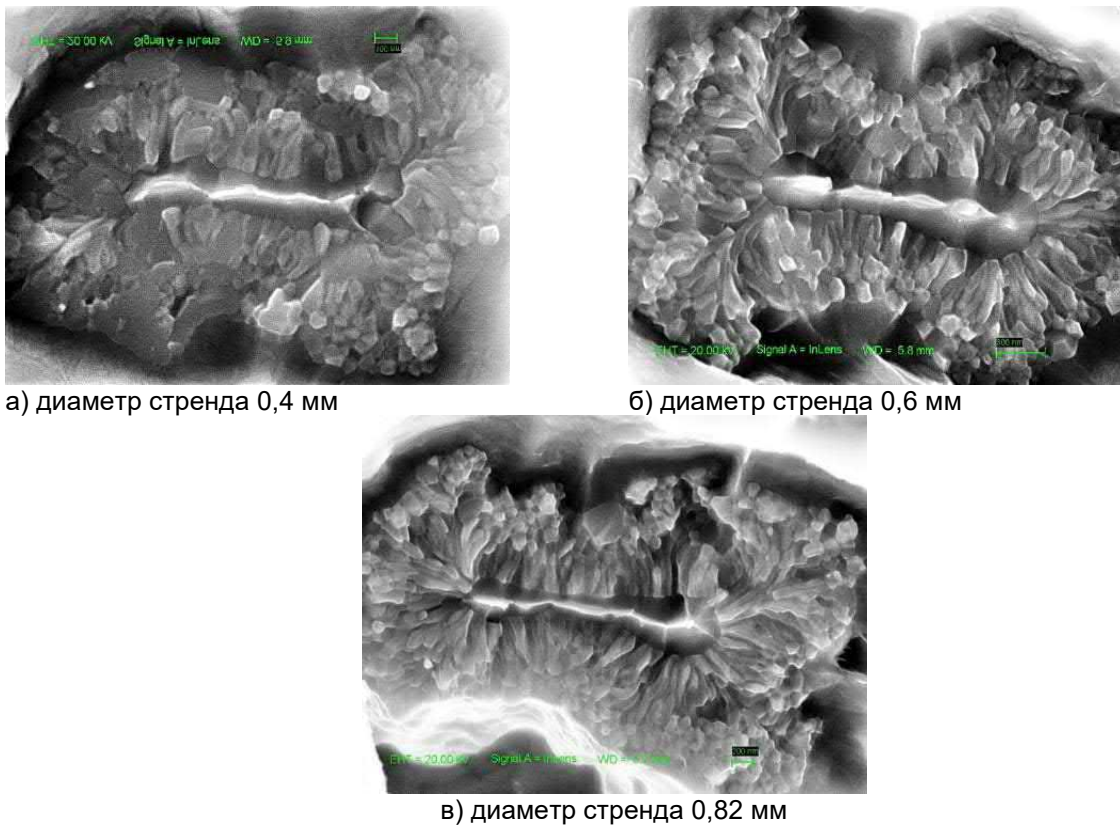
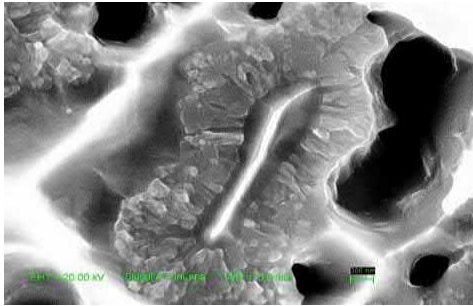
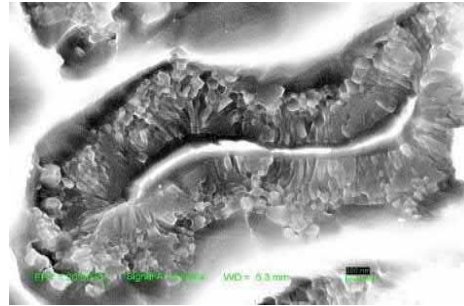


Рис. 6. Фрагменты микроструктуры поверхности излома Nb_3Sn стрендов для ИТЭР диаметром 0,4, 0,6 и 0,82 мм после РТО по режиму: 575 °С, 100 ч + 650 °С, 100 ч, РЭМ



а) диаметр стренда 0,8 мм



б) диаметр стренда 1 мм

Рис. 7. Фрагменты микроструктуры поверхности излома Nb_3Sn стрендов ДМ1,0 на \varnothing 0,8 и 1 мм после РТО по режиму: 575 °С, 100 ч + 650 °С, 100 ч, РЭМ

Как видно из рис. 6 и 7, микроструктуры слоев Nb_3Sn рассматриваемых образцов партий ДМ 1 и ИТЭР практически не отличаются. Количество остаточного Nb в волокнах и толщина слоя Nb_3Sn близки, но отмечена разница в морфологии зеренной структуры, а именно в

соотношении размеров зон столбчатых и равноосных зерен.

На рис. 8 и 9 представлена зависимость размера зерна в различных зонах от диаметра волокна в образцах стрендов ИТЭР, ДМ1 и ДМ1,5 после РТО.

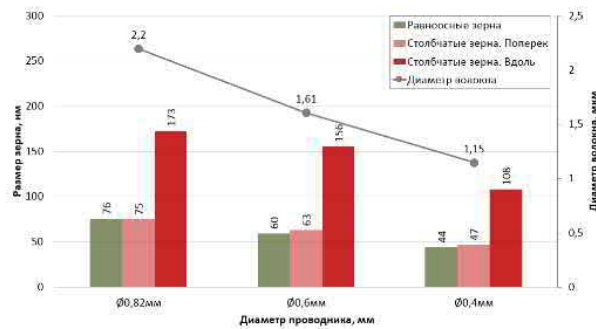


Рис. 8. Зависимость размера зерен от диаметра Nb_3Sn волокон в образцах стренда для ИТЭР разного диаметра после РТО по режиму: 575 °С, 100 ч + 650 °С, 100 ч

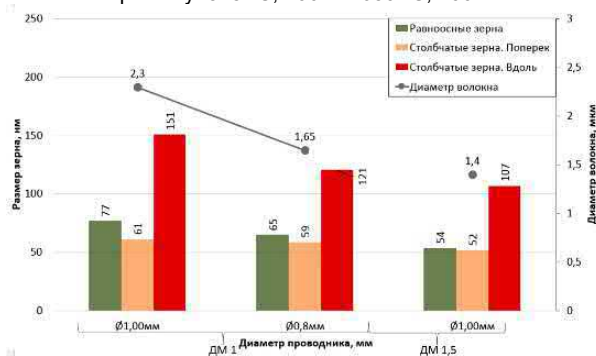


Рис. 9. Зависимость размера зерен от диаметра Nb_3Sn волокон в образцах ДМ1 и ДМ1,5 разного диаметра после РТО по режиму: 575 °С, 100 ч + 650 °С, 100 ч

Отмечено, что с уменьшением диаметра волокна уменьшаются размеры как равноосных, так и столбчатых зерен. Уменьшение диаметра ниобиевого волокна приводит к пропорциональному снижению размеров зерен в слое Nb_3Sn вследствие пространственного ограничения роста слоя при РТО. При уменьшении диаметра волокна увеличивается плотность зародышей

при образовании сверхпроводящей фазы, а последующий рост столбчатых зерен ограничивается ранним столкновением соседних кристаллитов. Процессы рекристаллизации и коалесценции зерен также подавляются в ограниченном объеме, что приводит к образованию более мелкозеренной структуры. При этом коэффициент столбчатости (отношение их

длины к ширине) почти не меняется (рис. 8 и 9). При этом увеличение содержания Sn в бронзовой матрице до 16 мас. % не привело к изменению размеров равноосных зерен Nb₃Sn слоя по сравнению с партией ИТЭР.

Проведен количественный анализ зеренной структуры сверхпроводящей фазы (таблица 3) для образцов ДМ1 и ДМ1,5 после двух режимов РТО и для ИТЭР.

Таблица 3

Результаты количественных исследований зеренной структуры сверхпроводящего слоя

| Образец | Объемная доля равноосных зерен, % | Объемная доля остаточного ниобия, % | Доля слоя столбчатых зерен, % | Средний размер равноосных зерен, нм | Козф. столбчатости |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| ТО 575°C100ч+650°C,100ч | | | | | |
| ДМ1,0 | 57 | 12 | 31 | 77±6 | 2,5 |
| ДМ1,5 | 56 | 11 | 33 | 54±5 | 3 |
| ИТЭР | 45 | 16 | 39 | 76±8 | 2,5 |

Сравнение образцов ДМ1,0 и ДМ1,5 и для ИТЭР показало, что увеличение содержания олова привело к росту доли равноосных зерен на ~12% (таблица 3) по сравнению с образцами ИТЭР. При этом отмечено, что произошло это за счет уменьшения объемной доли остаточного ниобия и столбчатых зерен на ~12%, что благоприятно для повышения токонесущей способности сверхпроводников.

Результаты определения средних размеров равноосных зерен для ДМ1, ДМ1,5 и ИТЭР приведены в виде гистограмм на рис. 10 и 11.

Как видно на рис. 10, проведение второй ступени термообработки при 650 °С приводит к смещению максимума по распределению зерен на 5-10 нм и средний размер зерна составляет 70 и 50 нм для партий ДМ1 и ДМ1,5 соответственно.

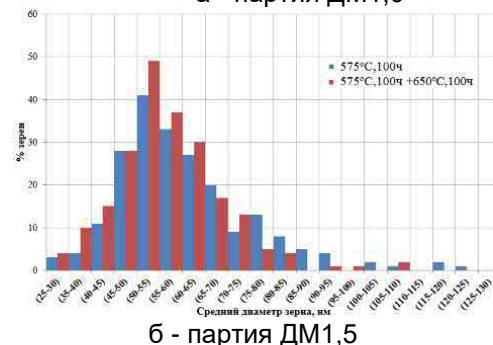
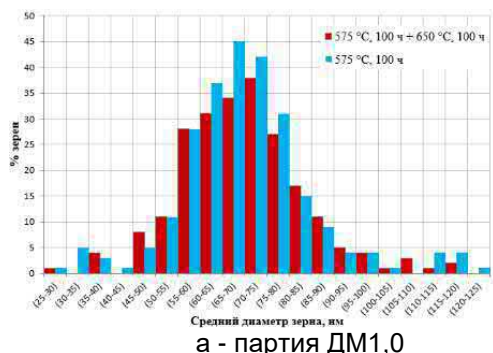


Рис. 10. Гистограмма распределения диаметра равноосных зерен Nb₃Sn образцов разных партий в зависимости от режима РТО

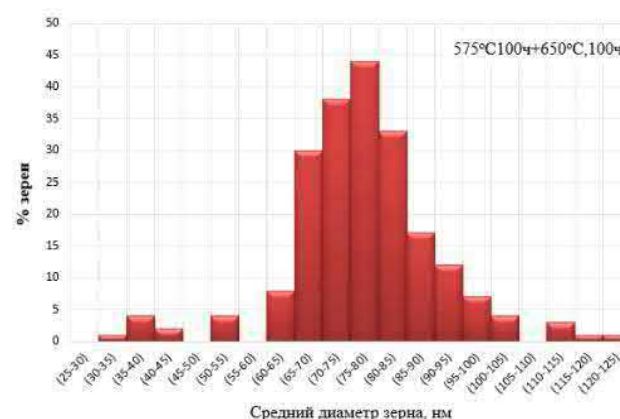


Рис. 11. Гистограммы распределения диаметра равноосных зерен Nb₃Sn образцов партии ИТЭР после РТО по режиму 575°C100ч+650°C,100ч

При сравнении образцов ДМ1 и ИТЭР, имеющих схожий размер волокна (2,2-2,3 мкм), отмечено, что они характеризуются аналогичным распределением зерен по размерам после РТО по режиму 575°C100ч+650°C,100ч (рис. 10, 11).

3.3 Исследование электрофизических характеристик

Проведены измерения критических характеристик образцов ДМ1,0 и ДМ 1,5 после РТО по режиму: 575 °С100ч+650 °С,100ч. Результаты измерения представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты измерения критических характеристик образцов проводников ДМ 1,0 и ДМ 1,5 в 12Тл

| Партия | Диаметр волокна, мкм | Ø, мм | Режим РТО | J _c , А/мм ² |
|--------|----------------------|-------|----------------------|------------------------------------|
| ДМ1,0 | 2,3 | 1 | 575°C100ч+650°C,100ч | 885 |
| ИТЭР | 2,2 | 0,82 | | 765 |
| ДМ 1,5 | 1,4 | 1 | | 651 |

Отмечено, что на образцах партии ДМ1,5 получены более низкие значения плотности критического тока по сравнению с партией ДМ1 и партией ИТЭР, что на основе результатов металлографического анализа можно объяснить более сильными искажениями и нарушениями целостности ниобиевых волокон меньшего диаметра.

Максимальное значение плотности критического тока 882 А/мм² в поле 12Тл достигнуто на образце партии ДМ1,0 Ø 1 мм, что превышает значения для Nb₃Sn стрендов для ИТЭР с содержанием 14 мас.% Sn.

Заключение

1. Проведено исследование сверхпроводящих стрендов на основе соединения Nb₃Sn диаметром 1мм, разработанных и изготовленных в АО «ВНИИНМ» по бронзовому методу, при использовании бронзовой матрицы с повышенным от 14 до 16 мас. % содержанием олова.

2. Анализ микроструктуры, проведенный методом металлографического анализа с использованием СЭМ, позволил установить, что повышение содержания олова в образцах многоволоконных стрендов (ДМ1,0 и ДМ1,5), отличающихся диаметром волокна, приводит к изменению морфологии зеренной структуры сверхпроводящего слоя, что выражается в увеличении доли равноосных зерен за счет снижения доли столбчатых зерен.

3. Также выявлено уменьшению доли остаточного ниобия (на ~12%) в волокнах и увеличение доли сверхпроводящей фазы в образцах с повышенным содержанием олова.

4. Проведены измерения критического тока и расчет J_c для образцов двух партий стрендов с повышенным содержанием олова. Установлено, что увеличение содержания Sn в бронзовой матрице позволяет повысить критическую плотность критического тока стрендов на 15% в 12 Тл при 4,2 К по сравнению образцами стрендов для ИТЭР с 14% Sn, изготовленными ранее.

Список литературы

1. Songtao W (the EAST team) 2007 An overview of the EAST project Fusion Eng. Des. 82 463–71. DOI:10.1016/J.FUSENGDES.2007.03.012
2. Nicollet S, Torre A, Girard S, Lacroix B, Reux C, Prochet P and (WEST Team) 2020 Thermohydraulic analysis of Tore Supra/WEST TF coil quench: associated smooth quench occurrence in tokamak Cryogenics 106 103042
3. Ahn H-J, Park H-K, Kim J, Kim Y O, Chu Y, Kim K P, Park K, Yoon S-W and Kim Y H 2019 Prediction of mechanical behavior of the KSTAR CS magnet based on PF coil currents Fusion Eng. Des. 146 594–7
4. Barabaschi P, Kamada Y and Shirai H (The JT-60SA Integrated Project Team) 2019 Progress of the JT-60SA project Nucl. Fusion 59 112005
5. Devred A et al 2013 Conductor qualification program for the ITER central solenoid IEEE Trans. Appl. Supercond. 23 6001208
6. Koizumi N et al 2012 Development of ITER TF coil in Japan IEEE Trans. Appl. Supercond. 22 4200404
7. Tamura H, Takahata K, Mito T, Imagawa S and Sagara A 2008 Mechanical behaviour analysis of superconducting magnet in LHD-type reactor FFHR J. Phys.: Conf. Ser. 97 012139
8. Sarasola X, Wesche R, Ivashov I, Sedlak K, Uglietti D and Bruzzone P 2020 Progress in the design of a hybrid HTS-Nb₃Sn-NbTi central solenoid for the EU DEMO IEEE Trans. Appl. Supercond. 30 4200705
9. Дергунова Е.А., Курилкин М.О., Алиев Р.Т., Коновалова Н.В. Материаловедение сверхпроводников на основе соединений А-15. Учебное пособие. -М.: МИФИ, 2009, 144 с.
10. Коновалова, Н.В. Исследование микроструктуры и механических свойств бронзы с повышенным до 16 мас. % содержанием Sn, используемой для Nb₃Sn сверхпроводников / Н.В. Коновалова, И.М. Абдюханов // ВАИТ. – 2019. – №3(99). – С. 15-25

11. A. V. Zlobin, V. V. Kashikhin, E. Barzi, *Effect of flux jumps in superconductor on Nb₃Sn accelerator magnet performance*, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 16(2), 1308 - 1311 (2006). DOI: 10.1109/TASC.2006.870557

12. Wu I. W. *The microstructure and critical current characteristic of a bronze-processed multifilamentary Nb₃Sn superconducting wire* [Текст]/ Wu I. W. [и др.]// *Journal of Applied Physics* – 1983 – №54(12) – P.7139-7152.

13. Krylova M. V., Abdyukhanov I. M., Tsapleva A. S. [и др.] *The microstructure of Nb₃Sn superconductors differing in the number of copper inserts at various stages of heat treatment* // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Proceedings of the 27th International Cryogenics Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference 2018. - 2019. - Vol. 502. - Art. 012174. - DOI: 10.1088/1757-899X/502/1/012174.*

14. Абдюханов И.М., Алексеев М.В., Цаплева А.С., Дергунова Е.А., Мареев К.А., Крылова М.В., Поликарпова М.В., Лукьянов П.А., Захарова Г.А., Панащук И.А., Карасев Ю.В., Мальченко А.В., Верификационные испытания Nb₃Sn и NbTi стрендов в АО "ВНИИНМ", как в референсной лаборатории национального агентства ИТЭР, по результатам всего промышленного выпуска на АО "ЧМЗ", ВАНТ. – 2017. № 1 (88). С. 4-18.

Поступила в редакцию / Received 07.07.2025

Поступила после рецензирования / Revised 27.11.2025

Принята к публикации / Accepted 02.12.2025