Статья

Изменение токонесущей способности в многожильных проводах сверхпроводящего интерметаллида Nb_3Sn при облучении быстрыми протонами с энергией до 32 МэВ

П. Н. Дегтяренко[1,*], С. Ю. Гаврилкин[2], А. Ю. Цветков[2]

1 Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 125412, Москва, Россия
2 Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии Наук, 100000, Москва, Россия
* e-mail: degtyarenkopn@inbox.ru

Сверхпроводящие провода на основе Nb_3Sn являются перспективными претендентами на использование в больших магнитных системах, например, в ускорителях и будущих термоядерных реакторах. Поэтому важной задачей является исследование изменения критических свойств этих проводов после интенсивного облучения быстрыми частицами. В данной работе представлены результаты измерений намагниченности многопроволочных проводов Nb_3Sn после облучения быстрыми протонами. Исследовались 4 типа проволок (образцы диаметром 0,7–1,2 мм), поставляемые различными производителями. Облучение всех образцов при комнатной температуре проводилось протонами с энергией 32 МэВ при 4 флюенсах до $1x10^{18}$ 1/см^2. Измерения намагниченности проводились на необлучённых и облучённых проводах Nb_3Sn при помощи вибрационного магнитометра в полях до 6 Тесла при температурах 7 и 12 К. Температура перехода T_c всех образцов определялась с помощью остаточного магнитного момента. Анализ экспериментальных данных облучённых образцов показал, что облучение оказывает сильное влияние как на величину, так и на функциональную зависимость нормированной силы пиннинга.

Ключевые слова: низкотемпературные сверхпроводники, пиннинг, критическая температура, протонное облучение, критическая плотность тока.

1. Введение

В процессе эксплуатации дипольные и квадрупольные магниты на основе многожильных проводов Nb_3Sn для ускорителей различного типа и установок термоядерного синтеза будут подвергаться облучению различными частицами высоких энергий, например, нейтронами, протонами и пионами [1–3]. Поэтому исследование особенностей электрофизических характеристик многожильных проводов Nb_3Sn до и после облучения быстрыми протонами является актуальной задачей физики прикладной сверхпроводимости. На сегодняшний день нет общих подходов в определение свойств низкотемпературных сверхпроводников, поэтому необходимо разработать подходы к определению электрофизических характеристик многожильных проводов Nb_3Sn, образовавшихся в результате радиационных дефектов.

В представленной работе обсуждаются результаты экспериментального исследования 4 коммерческих многожильных проводов Nb_3Sn. Подробные характеристики — тип образцов проволоки, диаметры и количество сверхпроводящих нитей — приведены в табл. 1 [4–6].

Таблица 1. Характеристики проводов Nb_3Sn

Тип провода	Диаметр, мм	Технология производства	Число жил
№0802	0,7	PIT+Ta (порошок в трубе)	114
№7419	0,8	RRP+Ta (внутренний источник олова с Ta барьером)	54
№11976	0,8	RRP+Ti (внутренний источник олова с Ti барьером)	108
№63468	1,2	BIN (бронзовая технология)	246

Проведены экспериментальные исследования влияния облучения протонами с энергией 32 МэВ при флюенсах 3×10^{16}, 1×10^{17}, 3×10^{17} и 1×10^{18} 1/см^2 на величину критической плотности тока J_c и критическую температуру T_c. Полученные нами результаты сравниваются с более ранними данными по тем же проволокам Nb_3Sn, облучённым протонами с энергией 65 МэВ и 24 ГэВ, а также нейтронами с энергией 1 МэВ, приведенными в работах [4–6], соответственно.

2. Экспериментальная методика

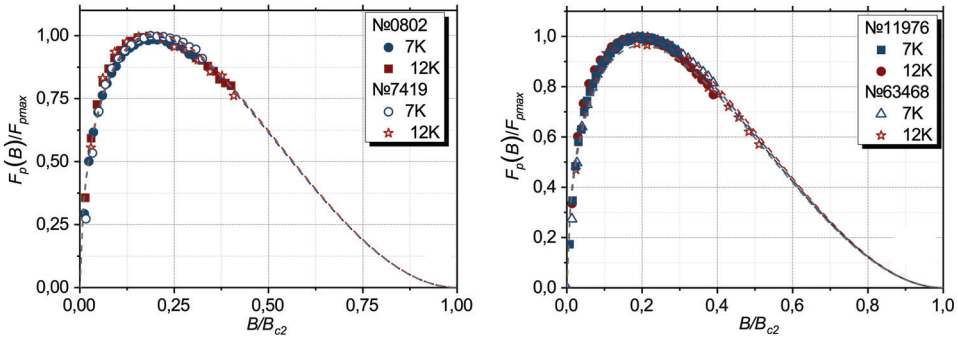
Кривые намагниченности сверхпроводящих проводов при температурах 7 и 12 К измерялись при помощи вибрационного магнитометра (установка PPMS с приставкой вибрационный магнитометр). Измерения проводились при внешнем магнитном поле, перпендикулярном оси провода, в диапазоне от 0 до 6 Тл со скоростью развертки поля — 10 мТл/с. Из-за высокой активности образцов были разработаны индивидуальные держатели для каждого из них. Длина образца в держателе составляла 3 мм. По окончании измерения кривой намагниченности температура образца повышалась со скоростью 1 К/мин и регистрировалась кривая остаточного магнитного момента в зависимости от температуры. Данная методика использовалась для всех необлучённых и облучённых образцов. Измерения намагниченности использовались для определения критических свойств сверхпроводников — J_c, B_{c2} и T_c. Критическая плотность тока в проводах до и после протонного облучения оценивалась с помощью аппроксимационного метода, описанного в [3].
Облучение образцов провода проводилось на изохронном циклотроне протонами с энергией 32 МэВ при флюенсе до 1×10^{18} 1/см^2. Процесс облучения образцов проводился при комнатной температуре в дистиллированной воде, что исключает перегрев образцов.

3. Результаты

На основе анализа экспериментальных данных кривых намагничивания [6] мы определили критическую плотность тока по формуле:

$$J_c = \frac{3\Delta m_{irr}}{4NL(r_0^3 - r_i^3)}, \qquad (1)$$

где $\Delta m_{irr}(\mu_0 H)=1/2(m_+(\mu_0 H)-m_-(\mu_0 H)$, N — число жил в проводе, L — длина провода, r_0 и r_i — внешний и внутренний радиусы жил. Для всех 4 типов сверхпроводящих многожильных проводов Nb_3Sn также определялась нормированная сила пининга до облучения при 7 и 12 К во внешнем магнитном поле до 6 Т (рис. 1).



(a) (b)

Рис. 1. Нормированная сила пиннинга для необлучённых образцов провода Nb_3Sn при температурах 7 и 12 К: a) №0802 и 7419; b) #11976 и №63468. Символами обозначены экспериментальные данные, прерывистой линией – аппроксимация по формуле (2) из [7]

До облучения экспериментальные данные аппроксимируются уравнением для объёмной силы пиннинга из [7], т.е:

$$F_p(B/B_{c2}(0)) = C_{unirr}(B/B_{c20}(0))^p(1-B/B_{c2})^q, \qquad (2)$$

где B — внешнее магнитное поле, p и q фиксированы при p=0,5 и q=2 соответственно (пиннинг на границах зерен [7]), C_{unirr} и $B_{c2}(0)$-второе критическое поле при температуре T=0 взяты в качестве подгоночных параметров.

На рис. 2 показана температурная зависимость B_{c2} для 4 типов необлучённых проволок, а экстраполированные значения

$$B_{c2}(T) = \frac{B_{c2}(0)}{0.693}(1 - t - C_1(1-t)^2 - C_2(1-t)^4), \qquad (3)$$

где C_1=0,153; C_2=0,152; $t=T/T_c$ имеет хорошее согласие с экспериментальными результатами работы [7].

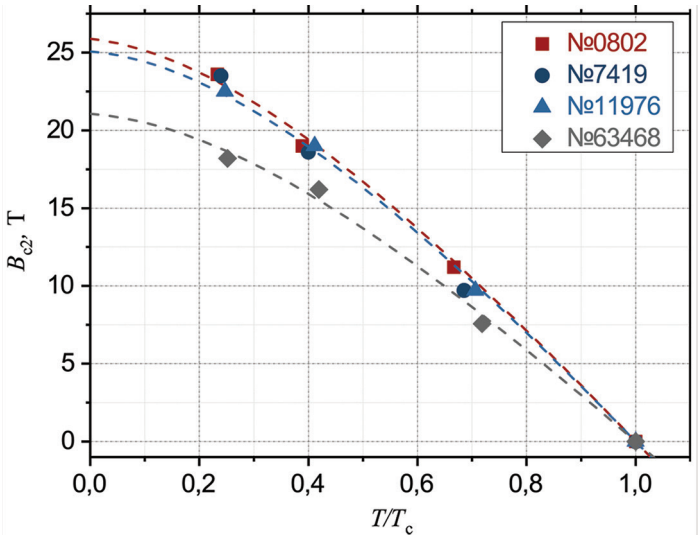


Рис. 2. Температурная зависимость верхнего критического поля для 4-х необлучённых проводов Nb_3Sn. Символами обозначены экспериментальные данные взятые из рисунка; пунктирной линией экстраполяция согласно [6]

Аналогичным способом мы оценили критическую плотность тока для всех 4 проводов после облучения (рис. 3). На рис. 4 представлена зависимость плотности критического тока от флюенса протонов для проводов №7419 и №11976 при 7 К. Отчётливо наблюдается увеличение плотности критического тока с флюенсом при больших внешних магнитных полях, которое сохраняется и при флюенсе 3×10^{17} 1/см^2 для провода №7419 при T=7 К. При меньших значениях внешних магнитных полей и 7К J_c увеличивается до 1×10^{17} 1/см^2, а затем начинает уменьшаться. Такое поведение при приложенном магнитном поле 6 Тл аналогично результатам, полученным в работах [4–5]. Наибольшее значение J_c, о котором сообщали эти авторы [4–5], было заметно выше, но общее поведение аналогичное: максимум J_c ожидался выше 1,4 x 10^{17} 1/см^2.

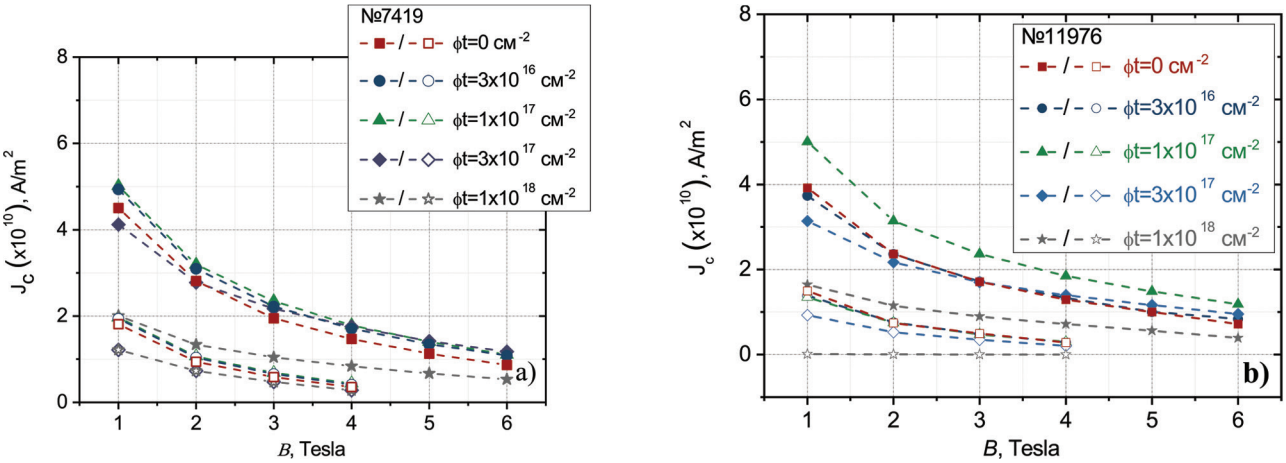


Рис. 3. Полевая зависимость плотности критического тока при различных флюенсах и температурах (закрытые символы – T=7 К, открытые символы – T=12 К): a) для образца провода №7419 и b) для образца провода №11976

Согласно [4], такое поведение связано с оптимальной концентрацией радиационных дефектов (точечный пиннинг) при флюенсах, близких к 3×10^{17} 1/см^2.

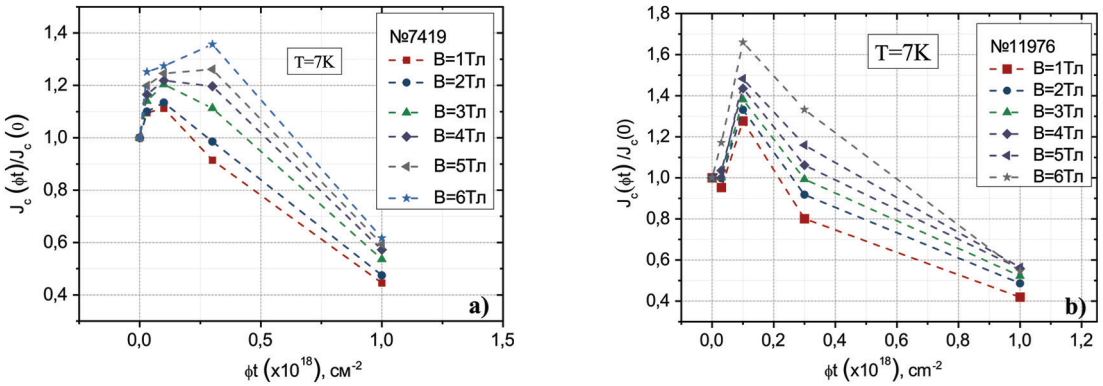


Рис. 4. Зависимость критической плотности тока от флюенса протонов для образца провода №7419 (a) и №11976 (b)

Слабая зависимость верхнего критического поля от флюенса показана на рис. 5. Выше 3x10^{17} 1/см^2 значения B_{c2} и T_c начинают уменьшаться. При 1x10^{18} 1/см^2 плотность критического тока и верхнее критическое поле достигают очень низких значений, а критическая температура снижается из-за уменьшения параметра атомного порядка (рис. 6).

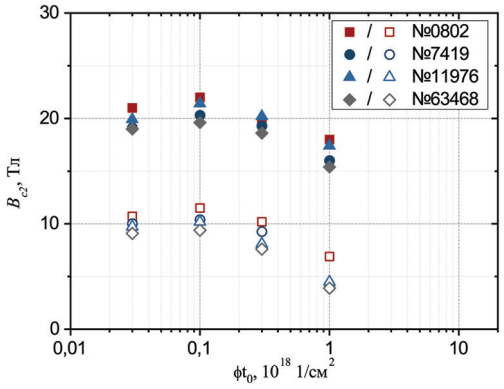


Рис. 5. Зависимость верхнего критического поля от флюенса протонов для образцов провода Nb_3Sn (см. табл.1). Закрытые символы температура T=7 K: открытые символы T=12 K

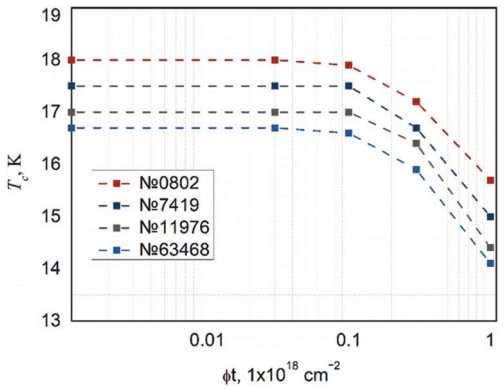


Рис. 6. Зависимость критической температуры от флюенса протонов для образцов провода Nb_3Sn (см. табл.1)

Для образца провода №11976 увеличение плотности критического тока наблюдается только до флюенса, близкого к 1×10^{17} 1/см^2, при приложенном магнитном поле около 6 Тл. При полях от 1 до 4 Тл значение J_c уменьшается.

4. Выводы

Проведены экспериментальные исследования намагниченности и остаточного магнитного момента для 4 типов проводов Nb_3Sn различной конфигурации и диаметра до протонного облучения при 7 и 12 К. Определена критическая плотность тока для всех 4 типов проводов до облу-

чения при 7 и 12 К при полях до 6 Тл. Проведено облучение этих проводов протонами с энергией 32 МэВ при флюенсах 3×10^{16}, 1×1017, 3×10^{17} и 1×10^{18} 1/см^2. Экспериментальные исследования намагниченности и остаточного магнитного момента для всех типов облученных образцов проводились при температуре 7 К и полях до 6 Тл. По этим данным определена критическая плотность тока для всех облучённых образцов. На основании этих экспериментальных результатов можно предложить некоторые выводы о влиянии облучения быстрыми протонами на электрофизические свойства проводов Nb_3Sn. Наблюдается общая тенденция — увеличение критической плотности J_c с ростом флюенса до 1×10^{17} 1/см^2, аналогично облучению протонами более высоких энергий [4], [5]. Значительные изменения T_c наблюдались для всех 4 образцов проводов до $1x10^{17}$ 1/см^2, при этом наблюдалось сильное снижение T_c при флюенсе выше 3×10^{17} 1/см^2. Облучение протонами с энергией 32 МэВ при флюенсе до $1x10^{18}$ 1/см^2 оказывает существенное влияние как на величину, так и на функциональную зависимость силы пиннинга проводов Nb_3Sn.

Литература

[1] H. W. Weber, J. Modern Phys. **20**, 1 (2011).
[2] C. L. Snead Jr, J. Nucl. Mater.**72**, 192 (1978).
[3] L. Bottura, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **22**, 4002008 (2012).
[4] T. Spina, et al., J. Phys.: Conf. Ser. **507**, 022035 (2014).
[5] T. Spina, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **25**, 6000505 (2015).
[6] T. Baumgartner, et al., Supercond. Sci. Technol., 27, 1, 015005 (2014).
[7] D. Dew-Hughes, Philosophical Magazine **30**, 293 (1974).
[8] P. N. Degtyarenko, et al., In Abstract of Applied Superconductivity Conference, 10-15 August, Charlotte, North Carolina (2014).
[9] T. Baumgartner, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **22**, 6000604 (2012).
[10] N. Degtyarenko, et al., Journal of technical physics, **58**, 2, 388, (1988).

Behavior of Magnetization Changes of Nb_3Sn Multifilamentary Wires after Fast Proton Irradiation with Energy up to 32 MeV

P. N. Degtyarenko[1]*, S. Yu. Gavrilkin[2], A.Yu. Tsvetkov[2]

1 Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 125412 Москва, Россия
2 Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Russia
* e-mail: degtyarenkopn@inbox.ru

Дегтяренко Павел Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Dr. Pavel Degtyarenko – Senior Researcher, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

Гаврилкин Сергей Юрьевич – научный сотрудник Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Sergey Gavrilkin – Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences.

Цветков Алексей Юрьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Dr. Alexey Tsvetkov – Senior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences.