

05.5

Влияние времени нарастания напряжения на переходные процессы при токовой перегрузке в стабилизированных ВТСП-проводах второго поколения

© В.А. Мальгинов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия
E-mail: malginovva@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 2 апреля 2019 г.
В окончательной редакции 22 июля 2019 г.
Принято к публикации 23 июля 2019 г.

Обнаружен эффект самопроизвольного обратного перехода стабилизированной ВТСП-ленты из нормального в резистивное состояние при быстром вводе напряжения и токовой перегрузке на переменном токе. Впервые установлено, что во время возникновения этого эффекта при толщине стабилизатора выше $13 \mu\text{m}$ основные тепловыделения происходят в медном стабилизаторе и эффективно отводятся в хладагент, что значительно снижает разогрев ВТСП-слоя. При этом падает сопротивление вторичного резистивного состояния и растет время его существования. Эти данные позволяют использовать обнаруженный эффект для увеличения времени токоограничения и надежности ВТСП-токоограничителей.

Ключевые слова: ВТСП-лента, слоистая структура, стабилизирующий слой, скачок напряжения, резистивное состояние.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.22.48640.17822

Исследование и анализ процессов, происходящих в композитных сверхпроводниковых материалах при протекании токов выше критического, необходимы для создания электротехнических устройств, удовлетворяющих требованиям электрических сетей по надежности, термической и электродинамической стойкости [1–3]. При этом сверхпроводящие элементы в зависимости от режима работы устройств могут находиться либо в сверхпроводящем, либо в резистивном, либо в нормальном состоянии. Например, при работе высокотемпературных токоограничивающих устройств (ВТСП ТОУ) существуют два механизма токоограничения: резистивный и тепловой [4]. При резистивном механизме ток превышает свое критическое значение и происходит переход высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) провода в резистивное состояние без полной потери сверхпроводимости. Резистивное состояние было теоретически рассмотрено для низкотемпературных сверхпроводников при охлаждении жидким гелием [3]. Показано, что такой переход в композитных сверхпроводниках имеет электромагнитную природу. Однако параметры кривой кипения жидкого гелия приводят к малости температурного диапазона ΔT с интенсивным пузырьковым теплоотводом $\Delta T \leq 1 \text{ K}$ [5], что делает устойчивое существование, а также наблюдение такого состояния при гелиевых температурах весьма проблематичным. Для ВТСП-материалов в жидком азоте достигаются значения $\Delta T \leq 20\text{--}25 \text{ K}$ [6], а устойчивые резистивные состояния уверенно наблюдаются в экспериментах с перегревом сверхпроводника до 8 K [7,8]. Теоретическое изучение процессов формирования макроскопических состояний сверхпроводящей ленты показывает суще-

ствование характерных значений напряженности электрического поля, зависящих от условий охлаждения и свойств сверхпроводника и стабилизирующей матрицы, которые лежат в основе теплоэлектродинамических механизмов, влияющих на крутизну нарастания вольт-амперных характеристик (ВАХ) технических сверхпроводников [9,10]. Широкие диапазоны температуры и тока, в которых устойчиво существует резистивное состояние, позволяют использовать эту область при проектировании ВТСП-устройств с повышенными возможностями. В частности, для ВТСП ТОУ ограничение тока в этом диапазоне будет носить безынерционный электромагнитный характер, а ограничивающее сопротивление будет определяться максимальными значениями тока и напряжения в резистивном состоянии. Для установившегося характера распределения тока между стабилизирующим и ВТСП-слоями на основании расчетной модели показано, что наличие медного стабилизатора в составе ВТСП-ленты может значительно увеличить предельные значения тока и напряжения резистивного состояния [11]. В частности, это происходит потому, что наличие медного стабилизатора позволяет преодолеть тепловую неустойчивость, связанную со сменой режима теплоотвода с конвекционного на пузырьковый [12]. Однако в реальных условиях токоограничение происходит при скачках напряжения тогда, когда резистивное состояние существует при нестационарном тепловыделении и теплоотводе. Поэтому экспериментальное изучение именно этого случая представляет наибольший практический интерес. При тепловом механизме токоограничения происходит переход ВТСП-провода в нормальное состояние. Провод больше не обладает сверхпроводни-

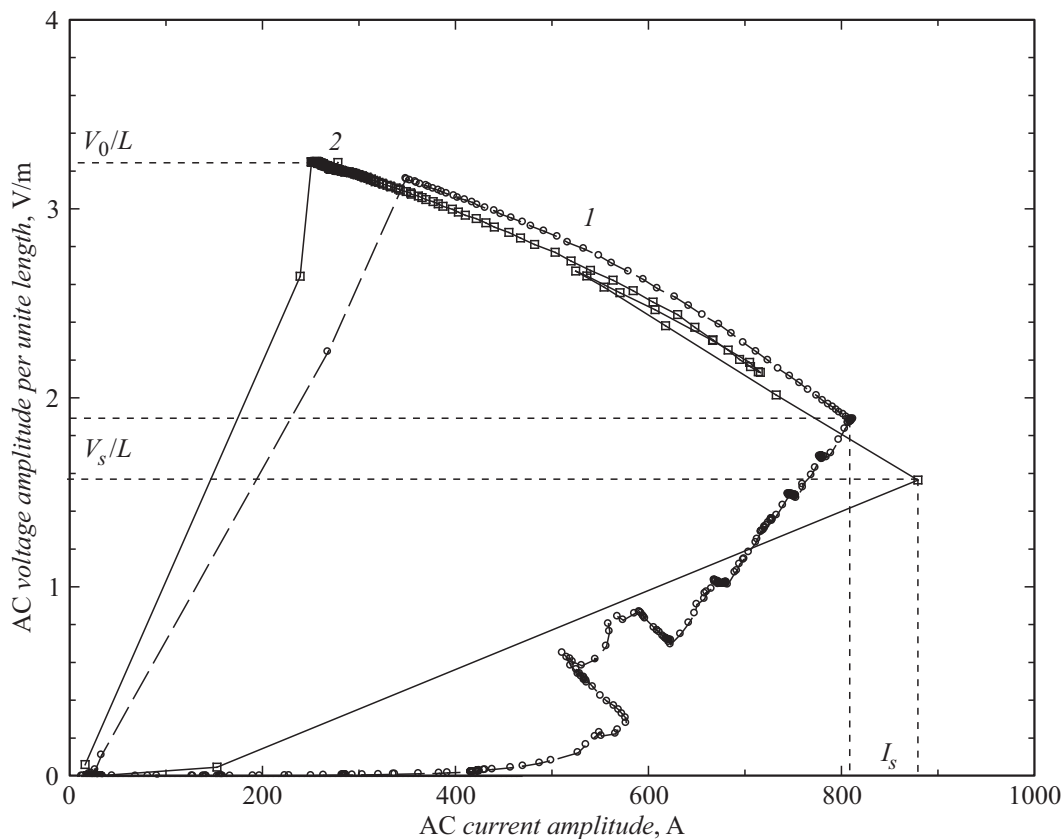


Рис. 1. Амплитудные ВАХ на переменном токе образца с толщиной стабилизатора $16 \mu\text{m}$. *1* — медленное нарастание напряжения, *2* — скачкообразное изменение напряжения.

мостью ни в какие моменты времени, что приводит к наличию его высокого активного сопротивления. Однако в этом случае возникает опасность перегрева провода и деградации его сверхпроводящих свойств [11,13]. При этих условиях токоограничители успешно работают при временах не более 100 ms, причем рекордные времена до 220 ms удалось получить при повышении стабилизации ВТСП-ленты [14]. Поскольку при тепловом механизме увеличения времени токоограничения резко повышает характеристики и возможности ВТСП ТОУ, возникает необходимость поиска оптимального типа лент и таких режимов работы, при которых не происходит перегрева ленты, сохраняется сопротивление и увеличивается полное время токоограничения. Таким образом, задача настоящей работы состоит в исследовании и анализе электрических и тепловых процессов в композитных ВТСП-лентах на всех стадиях перехода их из сверхпроводящего в нормальное состояние как при изменении параметров провода, так и при разных режимах его испытаний за счет изменения скорости подачи внешнего напряжения.

Для выполнения поставленной задачи были использованы образцы шириной 12 mm и длиной 24 cm фирмы СуперОкс с одинаковой структурой ВТСП-слоя и различной (от 0 до $40 \mu\text{m}$) толщиной d медного стабилизирующего слоя. Особенности структуры этих проводов более подробно описаны в [15,16]. При испытаниях на

образцы подавалось переменное напряжение частотой 50 Hz двух типов. Первый тип — напряжение с медленным повышением амплитуды в течение 8–10 s, второй тип — скачкообразное повышение амплитуды напряжения, когда в течение первых 0.1 s амплитуда напряжения уже составляет не менее 80% от максимальной амплитуды V_0 . Пример воздействия этих импульсов на ВТСП-ленту с толщиной стабилизатора $16 \mu\text{m}$ показан на рис. 1. Кривая *1* — амплитудная ВАХ при медленном нарастании напряжения, кривая *2* — при скачкообразном. Из характера поведения ВАХ можно выявить особенности фазовых переходов в зависимости от интенсивности роста подаваемого напряжения. Как видно из рисунка, при медленном нарастании напряжения ВАХ имеет вид, характерный для сверхпроводящих образцов: до критического тока (около 300 A) напряжение близко к нулю, затем начинается резистивный участок ВАХ, при котором напряжение равномерно распределяется по всему образцу. При токе I_s и напряженности электрического поля V_s/L (L — длина образца) резистивная ветвь ВАХ достигает максимума и часть образца необратимо переходит в нормальное состояние. При скачкообразном нарастании напряжения (кривая *2*) максимальные значения резистивного состояния достигаются через время t_0 , близкое к 40 ms. Затем часть образца переходит в нормальное состояние, и при достижении напряжения V_1 , тока I_1 и времени $t_1 \approx 100$ ms создаются условия, при

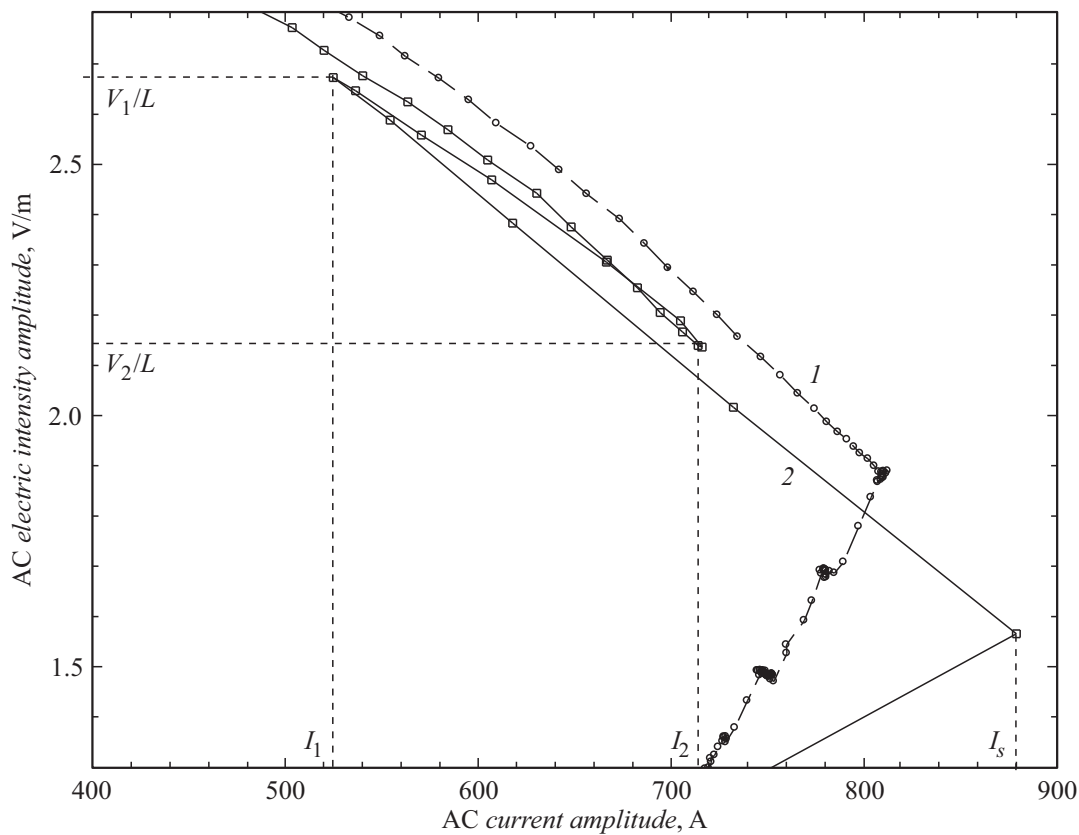


Рис. 2. Возникновение вторичного резистивного состояния при быстрой подаче напряжения на образец с толщиной стабилизатора $16 \mu\text{m}$. 1 — медленное нарастание напряжения, 2 — скачкообразное изменение напряжения.

которых возникает вторичное резистивное состояние (рис. 2), которое существует в образце до времени t_2 при токе I_2 . Переход во вторичное резистивное состояние наблюдается и визуально по характеру кипения жидкого азота на образце (в нормальном состоянии кипение на малой части образца, а в резистивном — по всей его длине). Как видно из рисунка, такой переход происходит только при быстром нарастании напряжения и не проявляется при его медленном изменении. Из этого следует, что возникновение данного явления происходит при снижении тока и при неустановившемся разогреве сверхпроводника, когда температура не успевает достичь своего критического значения, что позволяет сверхпроводнику вернуться в резистивное состояние и оставаться в нем в течение времени $t_2 - t_1$.

Изменение температуры dT связано с разницей между тепловыделениями и теплоотводом за время dt . Тогда, согласно уравнению теплового баланса, зависимость dT от dt имеет следующий вид:

$$dT = \frac{1}{C(T)s} \left[\frac{V}{2L} \frac{I}{a} - 2q(T) \right] dt. \quad (1)$$

В (1) V и I — амплитуды напряжения и тока в образце, $C(T)$ — объемная теплоемкость ленты, $q(T)$ — плотность теплового потока в хладагент, s — эффективная толщина разогретого слоя, L и a — длина и ширина ленты.

Выражение (1) позволяет качественно описать характер разогрева вблизи точки перехода из резистивного в нормальное состояние и обратно. При медленном вводе тока dT отображает среднюю температуру поперек провода, которая к моменту перехода в нормальное состояние близка к критической температуре сверхпроводника. По этой причине переход провода в нормальное состояние при наличии в нем тепловыделений уже происходит необратимым образом. Иная ситуация при быстрой подаче напряжения. Во-первых, время t_0 мало, и температура разогрева провода перед переходом его в нормальное состояние будет много меньше критической. Во-вторых, при неустановившихся процессах тепловыделений и теплоотвода необходимо рассматривать особенности разогрева каждого слоя. Поскольку толщина ВТСП-слоя s на порядок ниже толщины медного стабилизатора, согласно выражению (1), интенсивность роста температуры в ВТСП-слое гораздо выше. При этом ВТСП-слой находится внутри ленты и окружен медной стабилизирующей оболочкой, которая уже имеет непосредственный контакт с жидким азотом. В данном случае теплоотвод от ВТСП-слоя затруднен и определяющую роль в изменении его температуры будет играть ток, который течет по этому слою. Его доля от полного тока ленты падает по мере того, как растет доля тока через стабилизатор. А ток в стабилизирующем слое пропорционален его толщине [17]. Из этого

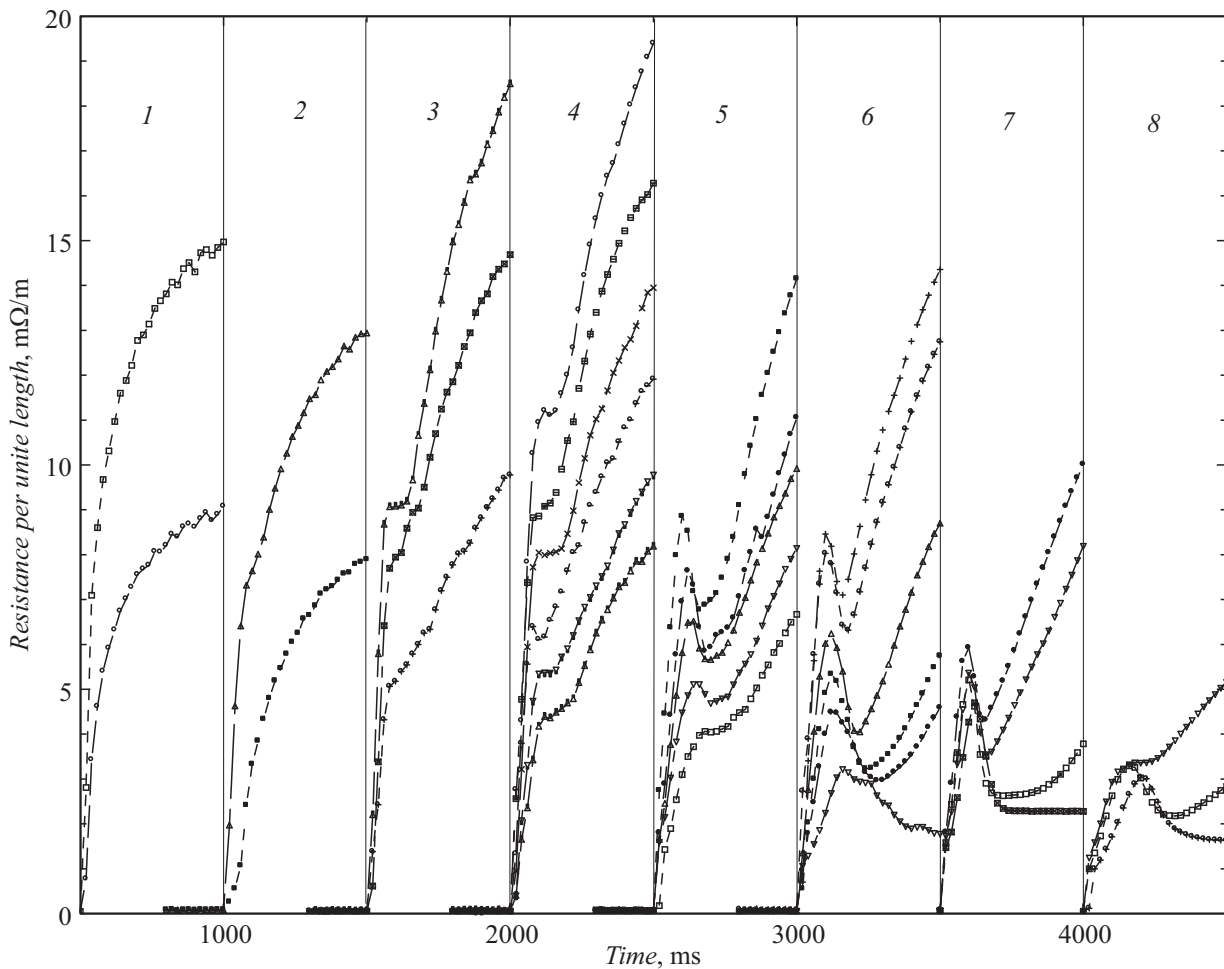


Рис. 3. Возникновение вторичного резистивного состояния при разных толщинах стабилизатора d и различной амплитуде скачков напряженности. $d, \mu\text{m}$: 1 — 0, 2 — 3, 3 — 5, 4 — 9, 5 — 13, 6 — 16, 7 — 27, 8 — 40.

следует, что нестационарный разогрев ВТСП-слоя будет снижаться по мере увеличения толщины стабилизатора, что при снижении тока (рис. 1) создаст дополнительные возможности для возвращения образца в резистивное состояние.

Характер изменения сопротивления образца в течение 500 ms после скачка напряжения и процесс возникновения и существования вторичного резистивного состояния при различной толщине стабилизатора и изменении уровня напряженности представлены на рис. 3. На этом рисунке для наглядности момент начала скачка напряжения для разных его уровней и одной толщины стабилизатора совмещены в одну точку, а эти точки для разных толщин разнесены по времени. Нижние кривые на рис. 3 соответствуют уровню электрической напряженности V_1/L , близкой к 2 В/м. Ниже этого уровня напряженность не достигает критической величины V_c/L и образец не переходит в нормальное состояние. Верхние кривые на рис. 3 формируются при уровне электрической напряженности V_1/L в диапазоне 4–5 В/м. Выше этого уровня при окончательном переходе в нормальное состояние образец начинает терять свои сверхпроводящие свойства [17]. Из рисунка видно,

что вторичное резистивное состояние возникает при толщинах стабилизатора выше 5 μm , а при толщине выше 13 μm увеличивается спад сопротивления во вторичном резистивном состоянии.

Таким образом, для широкого диапазона толщин стабилизатора при быстрой подаче напряжения обнаружен эффект самопроизвольного обратного перехода ВТСП-ленты из нормального в резистивное состояние.

Установлено, что при толщине стабилизатора выше 13 μm основные тепловыделения происходят в медном стабилизаторе. При временах менее 100 ms эти тепловыделения в основном отводятся в хладагент и слабо влияют на повышение температуры соседнего ВТСП-слоя. При этом падает сопротивление вторичного резистивного состояния и растет время его существования. А значит, в течение этого времени токоограничивающее сопротивление и тепловыделения распределены по всей длине проводника и ВТСП-элементы находятся при температуре, близкой к температуре жидкого азота. Эти экспериментальные данные были получены впервые и открывают дополнительные возможности для повышения времени токоограничения и надежности ВТСП ТОУ.

Благодарности

Автор благодарит генерального директора фирмы СуперОкс С.В. Самойленкова, а также Д.А. Горбунову за предоставление серии ВТСП-образцов для исследований.

Финансирование работы

Работа выполнена на оборудовании ЦКП ФИАН при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 17-29-10003.

Список литературы

- [1] Superconductors in the power grid: materials and applications / Ed. C. Rey. Cambridge: Elsevier, 2015. 437 p.
- [2] Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. М.: Мир, 1985. 407 с.
- [3] Гуревич А.В., Миц Р.Г., Рахманов А.А. Физика композитных сверхпроводников. М.: Наука, 1987. 240 с.
- [4] Волков Э.П., Флейшман Л.С., Мальгинов В.А., Мальгинов А.В. // Изв. РАН. Энергетика. 2009. № 2. С. 64–76.
- [5] Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия, 1977. 288 с.
- [6] Roy F. // 2nd Int. Workshop on modeling HTS. Cambridge, UK, 2011. P. 18.
- [7] Fetisov S.S., Vysotsky V.S., Zubco V.V. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2011. V. 21. N 3. P. 1323–1327.
- [8] Zubko V.V., Ryabov S.M., Fetisov S.S., Vysotsky V.S. // Phys. Proc. 2015. V. 67. P. 619–624.
- [9] Романовский В.Р. // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 1. С. 87–97.
- [10] Романовский В.Р. // ЖТФ. 2017. Т. 87. В. 1. С. 49–58.
- [11] Мальгинов В.А., Мальгинов А.В., Флейшман Л.С., Ракитин А.С. // ЖТФ. 2017. Т. 87. В. 10. С. 1509–1517.
- [12] Мальгинов В.А., Мальгинов А.В., Флейшман Л.С. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. В. 7. С. 25–28.
- [13] Мальгинов А.В., Кунцевич А.Ю., Мальгинов В.А., Флейшман Л.С. // ЖЭТФ. 2013. Т. 144. В. 6. С. 1225–1238.
- [14] <http://www.superox.ru/news/fevral2016/948/>
- [15] Samoilenkov S., Molodyk A., Lee S., Petrykin V., Kalitka V., Martynova I., Makarevich A., Markelov A., Moyzykh M., Blednov A. // Supercond. Sci. Technol. 2016. V. 29. N 2. P. 024001.
- [16] Lee S., Petrykin V., Molodyk A., Samoilenkov S., Kaul A., Vavilov A., Vysotsky V., Fetisov S. // Supercond. Sci. Technol. 2014. V. 27. N 4. P. 044022.
- [17] Мальгинов В.А., Мальгинов А.В., Горбунова Д.А. // ЖТФ. 2018. Т. 88. В. 5. С. 733–739.