

05.5

## Максимальные параметры резистивного состояния и влияние уровня напряжения на деградацию сверхпроводящих свойств в стабилизированных высокотемпературных сверхпроводящих проводах второго поколения

© В.А. Мальгинов

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

Поступило в Редакцию 20 февраля 2021 г.

В окончательной редакции 22 марта 2021 г.

Принято к публикации 26 марта 2021 г.

Установлено, что в стабилизированных высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалах переход между сверхпроводящим и резистивным состоянием носит электромагнитный характер, а резистивное состояние имеет универсальные характеристики по напряжению и сопротивлению на единицу длины:  $0.040 \text{ V/cm}$  и  $50 \mu\Omega/\text{cm}$  соответственно. Обнаружено, что после перехода из резистивного в нормальное состояние при уровне напряжения в нормальном состоянии более  $0.7 \text{ V}$  происходит необратимое разрушение сверхпроводящих свойств ВТСП-материала. Полученные характеристики позволяют определить безопасный уровень работы, а также оценить сопротивление и уровень напряжения в ВТСП-элементах электрооборудования, использующего стабильный резистивный режим.

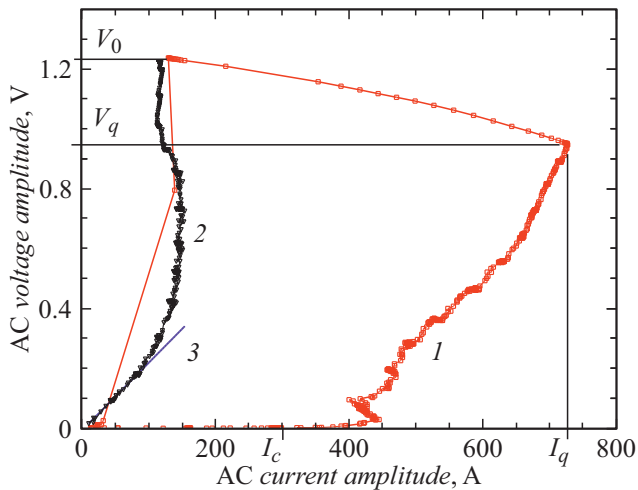
**Ключевые слова:** высокотемпературный сверхпроводник, медный стабилизатор, резистивное состояние, разрушение сверхпроводящего слоя, ВТСП-устройство.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.13.51113.18744

Изучение тепловых и электродинамических процессов, происходящих в технических сверхпроводниках, создает основу для поиска оптимальных режимов надежной работы при создании электротехнических устройств [1–4]. С развитием технологии изготовления технических высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) возник практический интерес к исследованию резистивного состояния. Для низкотемпературных сверхпроводников при охлаждении жидким гелием температурный диапазон с интенсивным пузырьковым теплоотводом (где и существует резистивное состояние) не превышает  $1 \text{ K}$ . Поэтому, несмотря на то что особенности резистивного состояния были теоретически детально изучены [3], практическое применение резистивного режима весьма затруднительно. Для ВТСП-материалов температурный диапазон с интенсивным теплоотводом в жидкий азот составляет  $15\text{--}25 \text{ K}$  [5,6], а устойчивые резистивные состояния существуют при перегреве ВТСП-ленты до  $8 \text{ K}$  [7]. Широкий диапазон существования резистивного режима позволяет использовать его уникальные свойства для практического применения. Одной из важных характеристик, которая определяет в электрооборудовании быстрдействие переключения режимов, является электромагнитная природа перехода (когда переход происходит за счет изменения тока) между сверхпроводящим и резистивным состоянием [3]. При этом, как показано в исследованиях на переменном токе [8], такой переход является обратимым и внутри каждого периода происходит практически мгновенно при возрастании и уменьшении тока и пересечении им

критического значения. Переход же из резистивного состояния в нормальное имеет тепловой характер и является необратимым [9]. Важными параметрами, которые, в частности, определяют глубину токоограничения в безынерционных ВТСП-токоограничителях [10], являются максимальные значения тока и напряжения в резистивном состоянии. Теоретически показано, что в этом состоянии на крутизну нарастания вольт-амперных характеристик (ВАХ) технических сверхпроводников оказывают влияние условия охлаждения и электродинамические свойства сверхпроводника и стабилизирующей матрицы [11]. При этом для масштабирования ВТСП-элементов с разной длиной провода необходимо экспериментально установить характерное значение электрического поля. В литературе влияние параметров стабилизатора на характеристики резистивного состояния рассматривалось как теоретически, так и экспериментально. В частности, результаты численного моделирования для постоянного тока [12] показывают, что для преодоления тепловой неустойчивости, связанной со сменой режима теплоотвода [13], необходимо увеличивать толщину стабилизирующего слоя. Также известно, что переход ВТСП-провода из резистивного в нормальное состояние создает аварийную ситуацию, поскольку в этом случае нормальная зона и тепловыделения сосредоточены на ограниченном участке, что приводит к опасности его перегрева и разрушения сверхпроводящего слоя [14].

Таким образом, для оптимальной и безопасной работы ВТСП-оборудования, использующего стабильный рези-



**Рис. 1.** ВАХ перехода из сверхпроводящего в нормальное состояние стабилизированного ВТСП-образца длиной 24 см (1), последствия перехода в нормальное состояние (2) и начальный участок ВАХ после разрушения сверхпроводящего канала (3).

стивный режим, необходимо экспериментально установить характерное значение напряженности электрического поля, которое для произвольной длины проводника позволит оценить уровень напряжения, при котором еще существует резистивное состояние, а также изучить и определить уровень напряжения, при котором переход провода в нормальное состояние не приводит к деградации его сверхпроводящих свойств. Решению этих задач и посвящена настоящая работа.

Для экспериментального исследования электрических и тепловых процессов в композитных ВТСП-лентах в режиме токовой перегрузки была применена методика измерений на переменном токе частотой 50 Hz [14,15]. В этом случае схема цепи была построена таким образом, что при возникновении в ВТСП-проводе резистивного и нормального состояний ток в цепи при слабом изменении напряжения определялся сопротивлением провода. Такой подход позволяет получить ВАХ при фазовых переходах и резком изменении сопротивления образца. Изучалась типичная стабилизированная ВТСП-лента шириной 12 mm, в структуре которой с каждой ее стороны находились слои медного стабилизатора толщиной 10  $\mu\text{m}$ . Этот материал был изготовлен фирмой SuperPower Inc.

Полный цикл испытаний для образца длиной 24 см представлен на рис. 1. Кривая 1 — амплитудная ВАХ, которая имеет вид, характерный для сверхпроводящих образцов: до критического тока (около 300 А) напряжение близко к нулю, затем начинается резистивный участок ВАХ, при котором напряжение и тепловыделение равномерно распределяются по всему образцу (это видно и визуально по характеру кипения на поверхности ВТСП-ленты в жидком азоте). При токе  $I_q$  и напряжении поля  $V_q$  резистивная ветвь ВАХ достигает максимума.

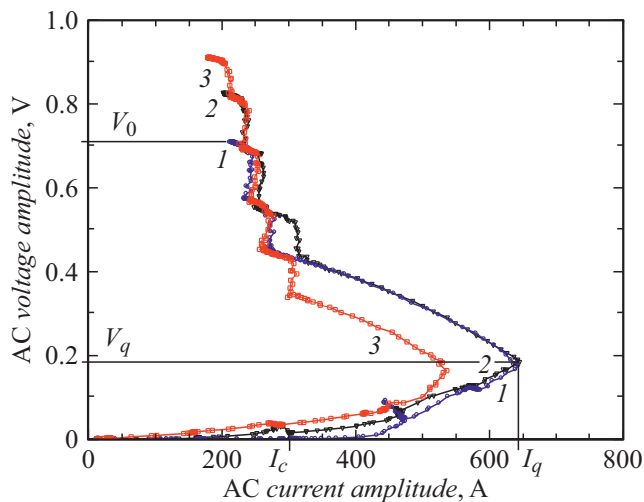
Многokратное изменение напряжения от нуля до  $V_q$  и обратно слабо изменяет вид ВАХ. Это означает, что переход между сверхпроводящим и резистивным состоянием имеет безгистерезисный характер, а резистивное состояние является устойчивым с однозначной связью между током и напряжением. Исходя из рис. 1 можно сделать количественные оценки напряженности и удельного сопротивления, характерные для резистивного состояния стабилизированных ВТСП-материалов. Так, максимальная напряженность электрического поля  $V_q/L$  ( $L$  — длина образца) будет составлять 0.040 V/cm, а максимальное удельное электрическое сопротивление резистивной ветви ВАХ  $R_q/L = V_q/(I_q L)$  будет находиться на уровне 50  $\mu\Omega/\text{cm}$ .

Когда напряжение превышает уровень  $V_q$ , образец переходит в нормальное состояние. Идет резкий рост сопротивления. Примерно через 1 с напряжение достигает значения  $V_0$ , а затем выключается. Последующий ввод тока в образец (кривая 2) показывает, что переход в нормальное состояние привел к полному разрушению сверхпроводящего канала, при этом сопротивление на единицу длины на начальном участке ВАХ (кривая 3) составляет 94  $\mu\Omega/\text{cm}$ , что близко к сопротивлению несверхпроводящих слоев при температуре 77 К.

Для детализации начальной стадии деградации сверхпроводящих свойств необходимо снизить напряжение  $V_q$ , выше которого появляется нормальный участок, где происходит интенсивный перегрев провода. Для решения этой задачи на рис. 2 показана серия ВАХ для образца длиной 7 см. Из рис. 2 видно, что величина  $V_q$  пропорциональна длине образца, а для уровня напряжения  $V_0$  менее 0.6 V переход в нормальное состояние не вызывает изменения в сверхпроводящих свойствах образца. При следующем вводе тока и повышении  $V_0$  до 0.71 V критический ток снижается, а после увеличения  $V_0$  до 0.83 V сверхпроводимость необратимо пропадает и образец приобретает активное сопротивление.

Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что параметры  $V_q/L$  и  $R_q/L = V_q/(I_q L)$  являются универсальными для различной длины образцов. Экспериментальные данные, полученные в работе [15] для стабилизированных ВТСП-проводов в широком диапазоне толщин медного стабилизатора, показывают монотонный рост предельных значений тока и напряжения резистивного состояния по мере увеличения толщины стабилизатора. В связи с этим полученные значения напряженности (0.040 V/cm) и удельного сопротивления (50  $\mu\Omega/\text{cm}$ ) могут служить основой для оценки нижней границы предельного уровня напряжения и верхней границы значения сопротивления ВТСП-элементов, в работе которых предусмотрен стабильный резистивный режим и используются провода различной длины с толщиной стабилизатора выше 10  $\mu\text{m}$ .

На обзорном рис. 3 показано влияние напряжения  $V_0$  на нормальном участке на изменение сопротивления образца при следующем вводе тока. Для исследования влияния времени нарастания тока использовался ввод



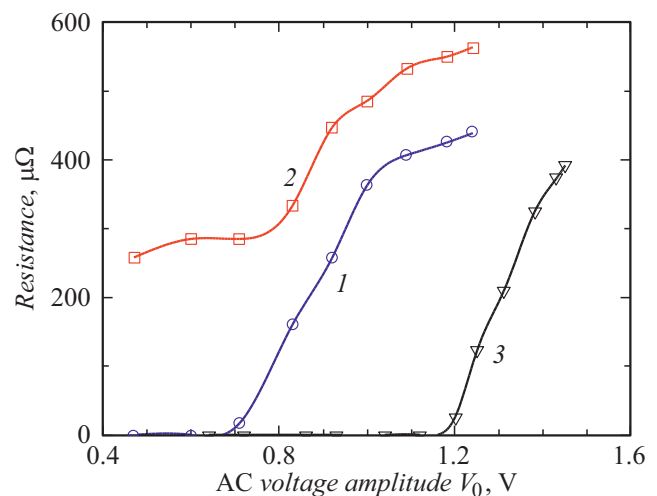
**Рис. 2.** Изменение формы ВАХ для образца длиной 7 см после перехода в нормальное состояние с амплитудой напряжения  $V_0 = 0.6$  (1), 0.71 (2) и 0.83 В (3).

напряжения двух типов: первый тип — медленное (в течение 8–10 с) повышение напряжения до значения  $V_q$  (такое изменение напряжения характерно и для рис. 1 и 2); второй тип — скачкообразное повышение амплитуды напряжения, когда в течение первой 0.1 с амплитуда напряжения уже составляет не менее 80% от максимальной амплитуды  $V_0$ . При медленном изменении напряжения после превышения им уровня  $V_q$  в части образца появляется активное сопротивление, которое в установившемся режиме достигает максимального разогрева при напряжении  $V_0$ . При скачкообразном нарастании напряжения максимальные значения резистивного состояния  $V_q$  достигаются через 40 мс. Затем образец за 1–2 с переходит в установившееся нормальное состояние. Из рисунка видно, что при медленном вводе тока сверхпроводимость в образце необратимо пропадает при  $V_0$  выше 0.7 В (кривая 1). При  $V_0 = 0.83$  В суммарное резистивное сопротивление и активное сопротивление сверхпроводящего слоя (кривая 2) сравниваются с сопротивлением подложки (которое соединено параллельно с сопротивлением сверхпроводящего слоя и для этого образца при 77 К равно  $650 \mu\Omega$ ). При дальнейшем увеличении  $V_0$  разрушение в сверхпроводящем слое таково, что сопротивление подложки будет определять полное сопротивление образца. При скачкообразном нарастании напряжения сверхпроводящий слой начинает разрушаться при повышенном напряжении (кривая 3). Это, видимо, связано с тем, что переход в нормальное состояние происходит без предварительного подогрева, отсутствуют тепловые неоднородности вдоль провода, что приводит к более равномерному разогреву провода. При этом максимальная температура разогрева, которая и приводит к разрушению провода, достигается при более высоком значении напряжения  $V_0$ .

На основе полученных данных можно определить критический размер образца, ниже которого при переходе в нормальное состояние еще возможно сохранение сверхпроводящих свойств в образце. Выше этого значения только сверхпроводящий и резистивный режимы работы не приводят к изменению свойств материала, а переход в установившееся нормальное состояние приводит к необратимым процессам в сверхпроводящем слое. Оценка критической длины  $L_c$  дает следующий результат:  $L_c = V_{0C}/(V_q/L) = 17$  см, где  $V_{0C} = 0.7$  В — напряжение разрушения,  $V_q/L = 0.040$  В/см — максимальная напряженность резистивного состояния. Для скачкообразной подачи напряжения  $L_c$  будет составлять 30 см.

Таким образом, обнаружено, что в стабилизированных ВТСП-материалах переход между сверхпроводящим и резистивным состоянием имеет электромагнитный характер, а напряжение и сопротивление в этом состоянии равномерно распределены по длине образца. Установлено, что в резистивном состоянии максимальная электрическая напряженность 0.040 В/см и сопротивление на единицу длины  $50 \mu\Omega/\text{см}$  являются универсальными характеристиками по длине, с помощью которых можно оценить верхний уровень сопротивления и нижнюю границу напряжения в ВТСП-элементах электрооборудования, использующих находящуюся в стабильном резистивном режиме ВТСП-ленту с толщиной медного стабилизатора выше  $10 \mu\text{м}$ .

Обнаружено, что если ВТСП-проводник при сверхкритическом токе переходит в нормальное состояние, которое длится более 1 с, то при плавной подаче напряжения с амплитудой более 0.7 В происходит необратимое разрушение сверхпроводящих свойств ВТСП-материала. Если же происходит скачкообразное повышение амплитуды напряжения, приводящее к переходу в нормальное



**Рис. 3.** Влияние уровня напряжения в установившемся нормальном состоянии на безвозвратное увеличение сопротивления ВТСП-образца. 1, 3 — изменение начального сопротивления при плавном и скачкообразном повышении напряжения, 2 — максимальное сопротивление в резистивном состоянии.

состояние, то необратимое разрушение сверхпроводящего слоя начинается с напряжения 1.2 V.

### Финансирование работы

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

### Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] В.А. Альтов, В.Б. Зенкевич, М.Г. Кремлев, В.В. Сычев, *Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем* (Энергоатомиздат, М., 1984), с. 312.
- [2] М. Уилсон, *Сверхпроводящие магниты* (Мир, М., 1985).
- [3] А.В.л. Гуревич, Р.Г. Минц, А.А. Рахманов, *Физика композитных сверхпроводников* (Наука, М., 1987).
- [4] *Superconductors in the power grid: materials and applications*, ed. by C. Rey (Elsevier, Cambridge, 2015), p. 437. DOI: 10.1016/B978-1-78242-029-3.00009-1
- [5] В.А. Григорьев, Ю.М. Павлов, Е.В. Аметистов, *Кипение криогенных жидкостей* (Энергия, М., 1977).
- [6] F. Roy, in *2nd Int. Workshop on modeling HTS* (Cambridge, UK, 2011), p. 18.
- [7] S.S. Fetisov, V.S. Vysotsky, V.V. Zubco, IEEE Trans. Appl. Supercond., **21** (3), 1323 (2011). DOI: 10.1109/TASC.2010.2093094
- [8] V.A. Malginov, L.S. Fleishman, D.A. Gorbunova, Supercond. Sci. Technol., **33** (4), 045008 (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab7470>
- [9] В.Р. Романовский, ЖТФ, **87** (8), 1185 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.08.44725.2080
- [10] В.А. Мальгинов, А.В. Мальгинов, Л.С. Флейшман, ЖТФ, **89** (12), 1853 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.12.48482.344-18
- [11] В.Р. Романовский, ЖТФ, **87** (1), 49 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.01.44018.1823
- [12] H.L. Quach, J.H. Kim, C.J. Hyeon, Y.S. Chae, J.H. Moon, H.M. Kim, Prog. Supercond. Cryogen., **20** (1), 19 (2018). <https://doi.org/10.9714/psac.2018.20.1.019>
- [13] В.А. Мальгинов, А.В. Мальгинов, Л.С. Флейшман, Письма в ЖТФ, **45** (7), 25 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.07.47532.17657
- [14] В.А. Мальгинов, А.В. Мальгинов, Л.С. Флейшман, А.С. Ракитин, ЖТФ, **87** (10), 1509 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.10.44995.2077
- [15] В.А. Мальгинов, А.В. Мальгинов, Д.А. Горбунова, ЖТФ, **88** (5), 733 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.05.45902.2419