

УДК 537.39; 538.945

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДЯЩЕГО ЭПОКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ НА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПРОВОДОВ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

В. А. Мальгинов

*В данной работе исследовалось влияние эпоксидного покрытия на характеристики сверхпроводящих проводов в различных фазовых состояниях. Установлено, что слой эпоксидного компаунда с высокой теплопроводностью не снижает критический ток и повышает термическую устойчивость ВТСП ленты к локальным возмущениям, по этой причине при переходе ее в резистивное и нормальное состояние тепловыделение происходит по всей длине сверхпроводника. В нормальном состоянии при токе до 700 А и электрических полях до 10 В/м тепловыделение в проводе полностью отводится в жидкий азот, а перегрев провода имеет установившийся характер и не превышает 80 К. При повышении электрического поля теплоотвод переходит в малоэффективный пленочный режим, что приводит к росту температуры и термическому разрушению образца.*

**Ключевые слова:** многослойные ВТСП провода, медный стабилизатор, композитный эпоксидный компаунд, теплопередача, термическая стойкость ВТСП проводов.

*Введение.* В настоящее время высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) провода используются при создании электрооборудования, в элементах которого возникают большие ponderomotive силы. При этом механическая стабилизация в ВТСП элементах достигается с помощью заполнения пустот в каркасе эпоксидным компаундом, который обладает высокой механической прочностью и низкой чувствительностью

---

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: malginovva@lebedev.ru.

к быстрым перепадам температур. В первых ВТСП катушках, из-за различия в тепловом расширении между эпоксидными смолами и ВТСП лентами [1], наблюдалось сильное снижение токонесущей способности сверхпроводящего провода. Показано, что уменьшить этот эффект можно с помощью добавления в эпоксидную смолу такого наполнителя, который увеличивает теплопроводность и уменьшает тепловое расширение композита [2, 3]. В настоящее время в криогенном диапазоне температур широко используется эпоксидный компаунд Stycast 2850FT, теплопроводность которого значительно превышает теплопроводность пластиковых (полиимидных) пленок, используемых для электроизоляционного покрытия ВТСП проводов [4]. Если вопрос о влиянии параметров эпоксидного покрытия на критический ток ВТСП проводов довольно широко освещен, то проблема термической стойкости компаундированных проводов при переходе ВТСП устройств в нормальное состояние в литературе отражена слабо. Изучение этой проблемы осложняется тем, что разогрев провода происходит при теплоотводе через эпоксидное покрытие, а температурная зависимость теплового потока в жидкий азот имеет особенности и нелинейный характер. Из справочных данных [5] известно, что при повышении температуры поверхности образца  $T_k$  на 1 К от температуры жидкого азота  $T_0 = 77$  К в теплоотводе существует тепловая неустойчивость, при которой во время перехода от конвективного к пузырьковому теплоотводу происходит перегрев провода [6]. При повышении температуры  $T_k - T_0$  до 15 К существует эффективный пузырьковый режим теплоотвода. Затем теплоотдача снижается и при  $T_k - T_0 > 30$  К падает более чем в 20 раз, а охлаждение переходит в малоэффективный пленочный режим. В этих условиях, для изучения термоэлектрических характеристик ВТСП элементов на всех стадиях перехода их из сверхпроводящего в нормальное состояние и их количественной оценки, требуется экспериментальное исследование. Этому вопросу и посвящена данная работа.

*Образцы и методика.* Для проведения исследований изготавливались два типа образцов, основу которых составляла композиционная ВТСП лента фирмы СуперОкс [7, 8]. Образцы без эпоксидного покрытия изготавливались из ленты с критическим током 380 А, шириной 12 mm и толщиной медных стабилизирующих слоев в 20  $\mu\text{m}$ . Для образцов с эпоксидным покрытием с двух сторон ленты на толщину  $d = 0.5 \cdot 10^{-3}$  m (такая толщина эпоксидного изолятора характерна для ВТСП обмоток) наносились слои компаунда из эпоксидной смолы Stycast 2850FT с добавлением в качестве наполнителя медного порошка. Медный порошок составлял 8% от объема компаунда, при этом сохранялся диэлектрический характер сопротивления компаунда, а теплоемкость

и теплопроводность повышались на 20–30%. При испытаниях была применена методика измерений на переменном токе частотой 50 Hz [9, 10]. Образцы находились в жидком азоте, и на них подавалось переменное напряжение как с медленным повышением амплитуды, так и при скачкообразном ее изменении.

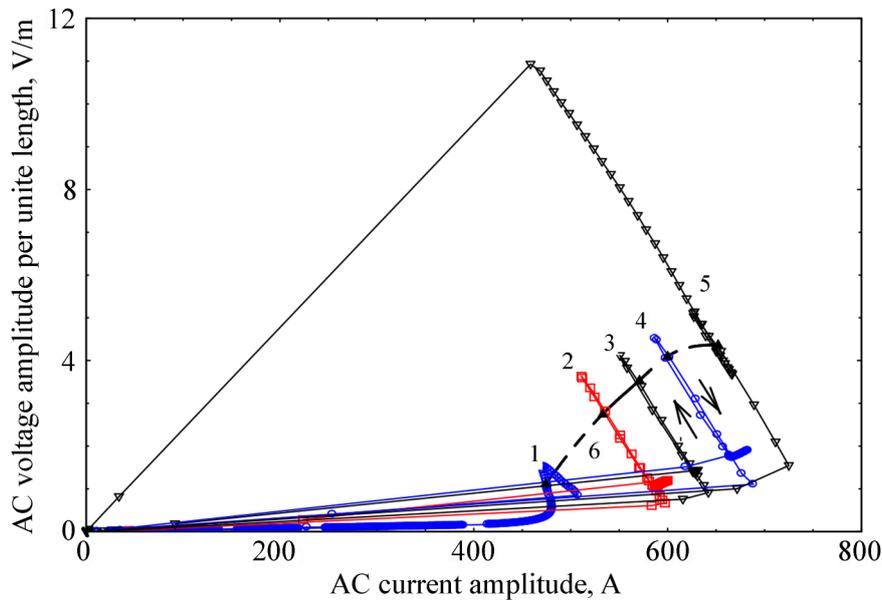


Рис. 1: Амплитудная ВАХ стабилизированного ВТСП образца без эпоксидного покрытия: 1 – медленный ввод тока до 508 А; 2 – скачок тока до 597 А; 3 – скачок тока до 642 А; 4 – скачок тока до 685 А; 5 – скачок тока до 725 А; 6 – граница нормальной зоны.

*Результаты и их обсуждение.* Амплитудная ВАХ для образца без эпоксидного покрытия приведена на рис. 1. Из рис. 1 можно оценить длительность электротепловых процессов, поскольку время между двумя соседними точками на кривых составляет 20 ms. Момент фазового перехода в нормальное состояние и достижение образцом полного омического сопротивления (кривая 6) определяется по характеру изменения осциллограмм напряжения [11].

Как видно из рис. 1, для проводов без эпоксидного покрытия на тепловой неустойчивости при скачках тока до 685 А (кривые 2–4) за 40–100 ms происходит обратимый переход из резистивного в нормальное состояние (пересечение кривыми 2–4 кривой 6, рост и спад сопротивления показан стрелками на кривой 4). При этом установившееся резистивное состояние существует до токов 685 А и электрических полей до 1.9 V/m. При токовой перегрузке в 725 А происходит переход провода в нормальное состояние

(кривая 5) с необратимой потерей его сверхпроводящих свойств. Разрушение образца связано с тем что, ВТСП лента с малой толщиной является неустойчивой к локальным тепловым возмущениям и, независимо от длины образца, нормальная зона возникает и существует на ограниченном участке [9]. В этом случае напряжение и тепловыделение сосредоточены в этой области и при напряжениях более 1 V (при электрическом поле в 4 V/m для наших образцов) происходит термическое разрушение сверхпроводящего и стабилизирующего слоев [10].

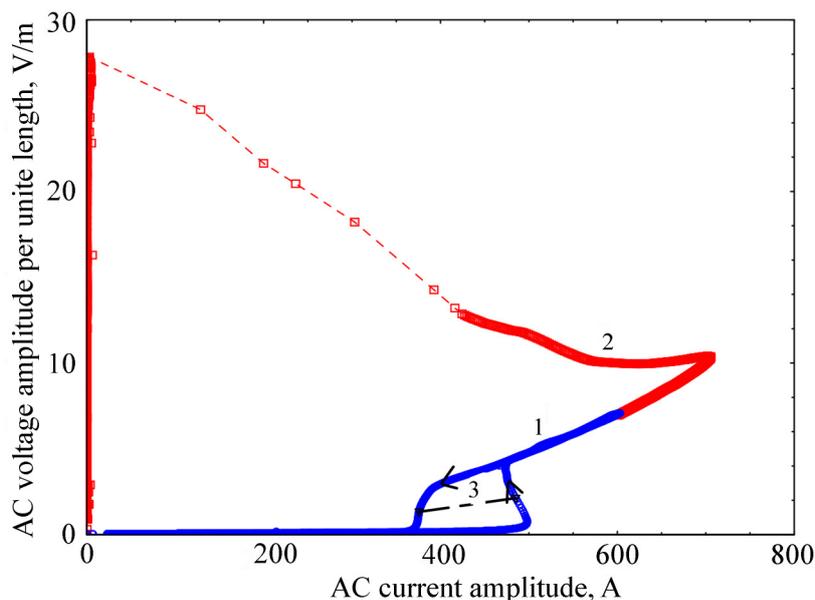


Рис. 2: Амплитудная ВАХ ВТСП образца с эпоксидным покрытием при медленном вводе тока: 1 – ввод тока до 604 А; 2 – ввод тока до 706 А; 3 – граница нормальной зоны.

Картина фазовых переходов существенно меняется для ВТСП лент, покрытых эпоксидным компаундом – рис. 2. Как видно из рис. 2, провод необратимо переходит в нормальное состояние на протяженной тепловой неустойчивости, связанной со сменой режима теплоотвода. При этом критический ток не снижается, но значительно сужается область существования устойчивого резистивного состояния (его максимальное электрическое поле 0.7 V/m и максимальный ток 500 А).

В нормальном состоянии образца протяженность несверхпроводящего участка и температуру провода  $T_m$  можно оценить с помощью его сопротивления  $r(T_m)$ , которое определяется Cu/Ag стабилизатором и имеет известную температурную зависимость [9].

Для наших образцов эта зависимость приобретает следующий вид:  $r(T_m)/L = (4.7 + 0.15(T_m - T_0)) \cdot 10^{-3} \Omega/\text{m}$  ( $L$  – длина образца). Также в установившемся режиме, при равенстве тепловыделений и теплоотвода, можно оценить температуру  $T_k$  внешней поверхности компаунда и перепад температуры по эпоксидному покрытию:  $T_m - T_k = E_0 I_0 d / 4 S \lambda$ , где  $E_0$  – амплитуда электрической напряженности,  $I_0$  – амплитуда тока,  $S = 12 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  – площадь 1 м ВТСП ленты,  $\lambda = 1.2 \text{ W/Km}$  – теплопроводность компаунда при  $T_k = 100 \text{ K}$ . Из рис. 2 видно, что при медленном вводе тока до 604 А и электрическом поле до 7 В/м (кривая 1) и последующем выводе тока ВАХ имеет установившийся и обратимый характер (гистерезис наблюдается только вблизи перехода в сверхпроводящее состояние). При этом перегрев провода  $T_m - T_0$  не превышает 50 К, а перегрев на поверхности образца  $T_k - T_0$  не более 10 К при пузырьковом режиме теплоотвода. Это означает, что слой компаунда повышает термическую устойчивость ВТСП ленты к локальным возмущениям и переход в нормальное состояние происходит по всей длине образца (этот факт подтверждается и визуально по характеру кипения азота на поверхности образца). После ввода тока до 706 А и остановки ввода при электриче-

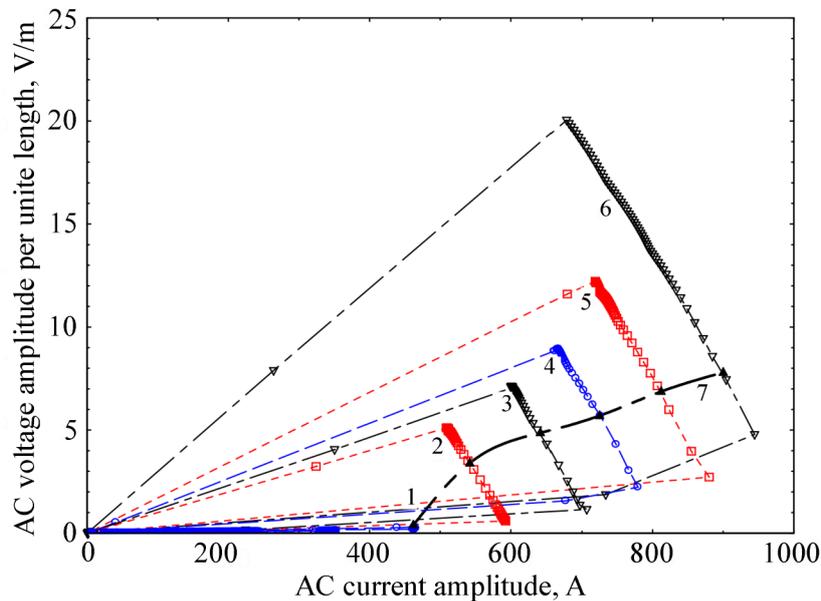


Рис. 3: ВАХ покрытого компаундом ВТСП образца при скачкообразном вводе тока: 1 – скачок тока до 463 А; 2 – скачок тока до 593 А; 3 – скачок тока до 704 А; 4 – скачок тока до 779 А; 5 – скачок тока до 879 А; 6 – скачок тока до 945 А; 7 – граница нормальной зоны.

ском поле 10 V/m (кривая 2) в течение первых 2.0 с идет медленный рост температуры перегрева ленты с 65 К до 85 К, а перегрев поверхности образца составляет 10–20 К. Затем рост сопротивления ускоряется и при перегреве провода в 170 К начинается его лавинный рост и происходит термическое разрушение провода.

На рис. 3 показано поведение покрытого компаундом образца при скачкообразных токовых перегрузках, длительность которых составляла около 1 с. Как видно из рис. 3 при скачках тока до 879 А резистивное состояние существует только в динамическом режиме и время его существования определяется пересечением кривых 1–5 с кривой 7.

При переходе в нормальное состояние рост сопротивления нормальной зоны с течением времени замедляется и при электрическом поле до 12 V/m переходит в квазиустановившийся режим. При перегрузке тока в 945 А (кривая 6) сопротивление (температура) монотонно растет и создается опасность разрушения образца.

Расчетные значения перегрева ленты  $T_m - T_0$  и перегрев поверхности эпоксидного компаунда  $T_k - T_0$  в зависимости от уровня электрического поля представлены на рис. 4.

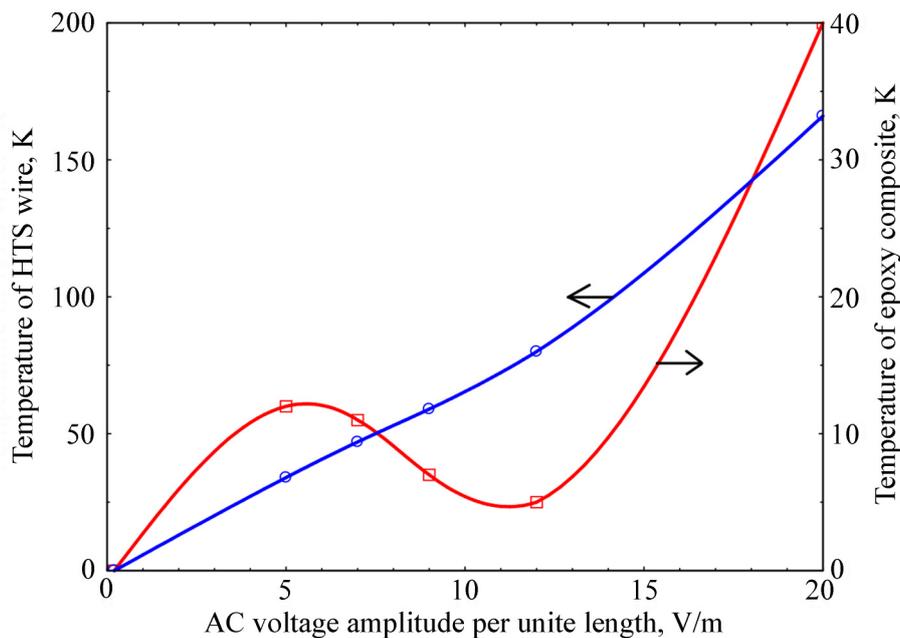


Рис. 4: Зависимость перегрева  $T_m - T_0$  ВТСП ленты и перегрева  $T_k - T_0$  поверхности эпоксидного покрытия от уровня электрического поля.

Из рис. 4 видно, что до уровня поля в 12 V/m перегрев провода не превышает 80 К, а перегрев поверхности образца находится на уровне 10–12 К. Это означает, что при скачкообразной перегрузке тока и электрического поля в 879 А и 12 V/m тепловыделения в

проводе полностью отводятся в жидкий азот за счет высокого теплового потока при пузырьковом режиме теплоотвода [5]. При этом элементы с высокой теплопроводностью эпоксидного покрытия являются термически защищенными, если нормальное состояние в них существует не более 1 с. При дальнейшем повышении электрического поля температура поверхности образца повышается, теплоотвод переходит в малоэффективный пленочный режим и возникают условия для термического разрушения провода.

*Заключение.* В данной работе обнаружено, что слой эпоксидного компаунда с высокой теплопроводностью не снижает критический ток и повышает термическую устойчивость ВТСП ленты к локальным возмущениям, по этой причине при переходе в резистивное и нормальное состояние тепловыделение распределяется по всей длине сверхпроводника. При медленном вводе тока до 700 А и электрических полях менее 10 В/м тепловыделения в проводе полностью отводятся в жидкий азот за счет высокого теплового потока при пузырьковом режиме теплоотвода, при этом перегрев покрытого эпоксидным компаундом элемента имеет установившийся характер и не превышает 80 К. При дальнейшем повышении электрического поля теплоотвод переходит в малоэффективный пленочный режим, что приводит к росту температуры и термическому разрушению образца. Установлено, что при скачкообразной перегрузке тока и электрического поля до 870 А и 12 В/м элементы с высокой теплопроводностью эпоксидного покрытия являются термически защищенными, если нормальное состояние в них существует не более 1 с. Полученные характеристики позволяют оценить безопасный уровень напряжения и максимальное время существования нормальной зоны в длинномерных проводах с эпоксидным покрытием.

Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А19-119083090048-5.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] C. Barth, N. Bagrets, K.-P. Weiss, et al., *Supercond. Sci. Technol.* **26**(5), 055007 (2013). <https://doi.org/10.1088/0953-2048/26/5/055007>.
- [2] M. Pekarchikova, M. Drienovskii, J. Krajcovich, et al., *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **138**, 4375 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08309-2>.
- [3] Yu. Dongmin, S. Yajie, Z. Huiming, et al., *Materials* **11**(4), 573 (2018). <https://doi.org/10.3390/ma11040573>.
- [4] S. Nakamura, T. Fujii, S. Matsukawa, et al., *Cryogenics* **95**, 76 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2018.09.001>.

- [5] В. А. Григорьев, Ю. М. Павлов, Е. В. Аметистов, *Кипение криогенных жидкостей* (М., Энергия, 1977).
- [6] S. S. Fetisov, V. S. Vysotsky, V. V. Zubco, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21**(3), 1323 (2011). DOI: 10.1109/TASC.2010.2093094.
- [7] S. Samoilenkov, A. Molodyk, S. Lee, et al., *Supercond. Sci. Technol.* **29**(2), 024001 (2016). DOI: 10.1088/0953-2048/29/2/024001.
- [8] A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Markelov, et al., *Sci. Rep.* **11**, 2084 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81559-z>.
- [9] А. В. Мальгинов, А. Ю. Кунцевич, В. А. Мальгинов и др., *ЖЭТФ* **144**(6), 1225 (2013). <https://doi.org/10.1134/S106377611314015X>.
- [10] В. А. Мальгинов, А. В. Мальгинов, Д. А. Горбунова, *ЖТФ* **88**(5), 733 (2018). <https://doi.org/10.1134/S106378421805016X>.
- [11] V. A. Malginov, L. S. Fleishman, D. A. Gorbunova, *Sci. Technol.* **33**(4), 045008 (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab7470>.

Поступила в редакцию 3 февраля 2022 г.

После доработки 20 мая 2022 г.

Принята к публикации 23 мая 2022 г.