

05.5

## Неравновесные состояния в ВТСП-композитах второго поколения при сверхкритических импульсных токовых воздействиях

© И.В. Анищенко, С.В. Покровский, М.А. Осипов, Д.А. Абин, Д.И. Грицаенко, И.А. Руднев<sup>†</sup>

Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия

<sup>†</sup> E-mail: IARudnev@mephi.ru

Поступило в Редакцию 14 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 22 июня 2021 г.

Принято к публикации 23 июня 2021 г.

Представлены результаты исследования процессов переключения ВТСП-композитов из сверхпроводящего в резистивное состояние при микросекундных токовых импульсах. Применялось два режима импульсной токовой нагрузки: с амплитудой  $\sim 1 \cdot I_c$  (так называемый „мягкий“ режим,  $I_c$  — величина критического тока) и с амплитудой  $\sim 3I_c$  („жесткий“ режим). Показана возможность пропускания сверхкритических токов через ленту без деградации характеристик сверхпроводника. Для анализа процессов, происходящих в ленте при протекании тока, была разработана 2D FEA (finite element analyses) модель, при помощи которой проведен расчет динамического сопротивления сверхпроводящего слоя ВТСП-композита и продемонстрированы процессы перераспределения тока между слоями ленты.

**Ключевые слова:** ВТСП-композиты, сверхпроводящий ключ, неравновесные состояния, устойчивое переключение, необратимое переключение.

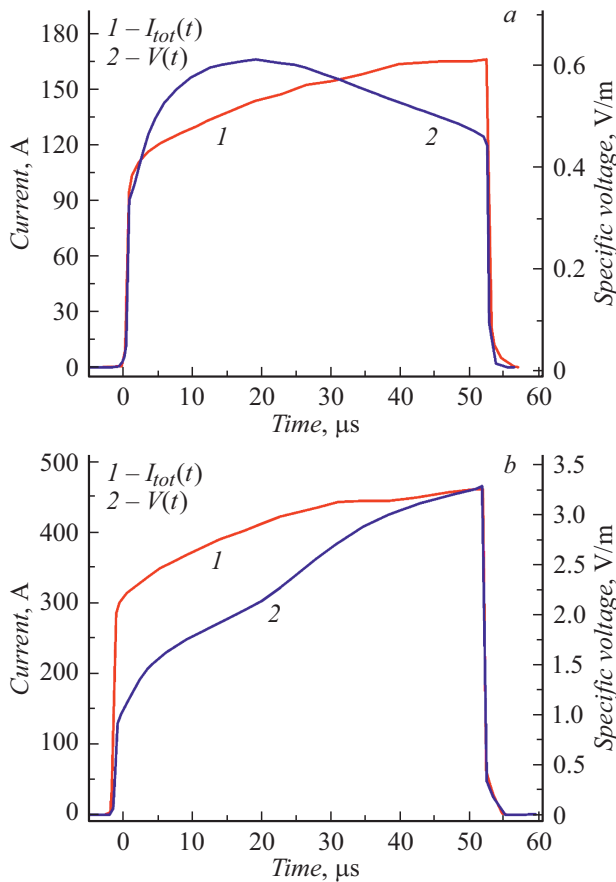
DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51508.18828

В настоящее время высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) композиты начинают заменять низкотемпературные сверхпроводники в коммутационных системах и часто становятся неотъемлемой частью таких устройств, как сверхпроводящие накопители энергии [1], ограничители тока [2], томографы МРТ [3]. Экспериментальные исследования и численное моделирование неравновесных состояний, возникающих в сверхпроводниках в условиях быстрой токовой сверхкритической (т.е. с амплитудой импульса, превышающей величину критического тока  $I_c$ ) нагрузки, являются важной задачей, решение которой необходимо для проектирования, создания и оптимизации коммутационных устройств различного назначения.

В настоящей работе рассматриваются процессы переключения ВТСП-композита в режиме „жесткой“ токовой нагрузки ( $\sim 3I_c$ ) и в режиме „мягкой“ токовой нагрузки ( $\sim I_c$ ). Экспериментальные исследования процессов переключения ВТСП-композитов при импульсных токовых нагрузках были выполнены с использованием коммерческих лент производства СуперОкс [4]. Использовались ВТСП-ленты шириной 4 мм с медным покрытием (толщина ВТСП-слоя 1  $\mu\text{m}$ , толщина слоя серебра 2  $\mu\text{m}$ , толщина медного покрытия 20  $\mu\text{m}$ , толщина подложки 80  $\mu\text{m}$ ). Критический ток композита при температуре кипения жидкого азота составлял  $I_c = 150$  А. Эксперименты по импульсной токовой нагрузке проводились в диапазоне амплитуд импульсов 0–460 А с длительностью импульса 50–250  $\mu\text{s}$  и фронтом нарастания импульса 1.5–5  $\mu\text{s}$ . Электрические измерения осуществлялись по четырехконтактной схеме с расстоянием между потенциальными контактами 6 мм в жидком азоте. На рис. 1 представлены зависимости тока и напряжения

через образец в режимах мягкой (а) и жесткой (b) токовой нагрузки. В первом режиме токовой нагрузки амплитуда импульса и время нарастания фронта воздействия составили 160 А и 3  $\mu\text{s}$ , во втором режиме — 460 А и 1.5  $\mu\text{s}$  соответственно. В режиме жесткой токовой нагрузки при увеличении амплитуды транспортного тока напряжение на образце продолжает неуклонно расти вплоть до полного снятия токовой нагрузки, тогда как в режиме мягкой токовой нагрузки наблюдается обратимое переключение ВТСП-композита, при котором при продолжении роста величины транспортного тока напряжение на образце начинает снижаться. Поведение сверхпроводящей ленты при пропускании импульса тока с временем роста порядка 1  $\mu\text{s}$  кардинально отличается от аналогичных результатов, полученных на импульсах с длительностями порядка миллисекунд [5,6], для которых зачастую характерны более стабильное поведение и задержка возникновения напряжения на образце во время приложения токового импульса.

Для объяснения процессов, происходящих в ВТСП-ленте при протекании токов, в несколько раз превышающих критический (жесткий режим), с помощью подхода, описанного в работе [7], была разработана двумерная модель для численного анализа таких систем на основе метода конечных элементов (finite element analyses, FEA). В отличие от работы [7] расчетный алгоритм был оптимизирован для расчета композитов с медным покрытием. Разработанная модель применима для оценки значений токов, протекающих в каждом слое ВТСП-ленты, и сопротивления сверхпроводящего слоя  $\rho(J, T)$  в зависимости от приложенного тока и локальной температуры. В основе описания физики тепловых процессов заложено стандартное уравнение



**Рис. 1.** Временные зависимости тока и напряжения на единицу длины между потенциальными контактами на образце при воздействии токового импульса. *a* — режим мягкой нагрузки (амплитуда импульса 160 А (~  $I_c$ ), скорость ввода тока 50 А/μs), *b* — режим жесткой нагрузки (амплитуда импульса 460 А (~  $3I_c$ ), скорость ввода тока 300 А/μs).

теплопередачи в твердых телах. Локальное тепловыделение во всех слоях ВТСП-ленты рассчитывается как произведение плотности тока и напряженности электрического поля. Модель также учитывает температурные зависимости теплопроводностей, теплоемкостей, электросопротивлений и плотностей всех использованных материалов. В рамках модели реализован режим охлаждения ВТСП-композита жидким азотом. При этом предусмотрены многократная смена режимов кипения хладагента с конвективного на пузырьковое и обратно, дополнительный перегрев (задержка кипения), гистерезисный характер кривой кипения жидкого азота [8,9].

В качестве источника тепла  $Q$  выступают все слои ленты,  $Q = J(t)E(t)$ , где напряженность электрического поля  $E(t)$  и плотность токов  $J(t)$  определяются исходя из экспериментальных данных как

$$E(t) = \frac{V_{meas}(t)}{l}, \tag{1}$$

$$J(t) = \frac{E(t)}{\rho_{mat}(T)}, \tag{2}$$

где  $V_{meas}(t)$  — зависимость экспериментально измеренного напряжения на расстоянии  $l$  между потенциальными контактами от времени,  $\rho_{mat}(T)$  — сопротивление материала, температурная зависимость которого точно известна для всех слоев ленты, кроме сверхпроводящего. Ток в каждом материале  $I_i^{mat}$  определяется путем интегрирования плотности тока по площади поперечного сечения соответствующего слоя  $S_i^{mat}$ . С использованием экспериментально измеренного общего тока  $I_{tot}(t)$  через ВТСП-ленту ток через сверхпроводящий слой может быть найден как

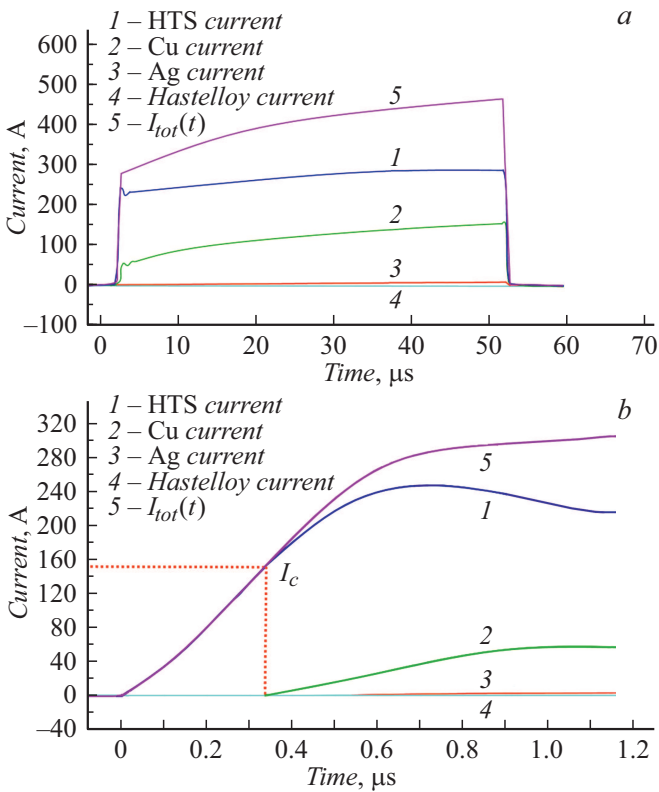
$$I_{HTS}(T(t)) = I_{tot}(t) - \sum_{i=1}^{n_{mat}} I_i^{mat}(T(t)). \tag{3}$$

И наконец, сопротивление ВТСП-слоя  $\rho_{HTS}(J, T)$  определяется в соответствии с выражением

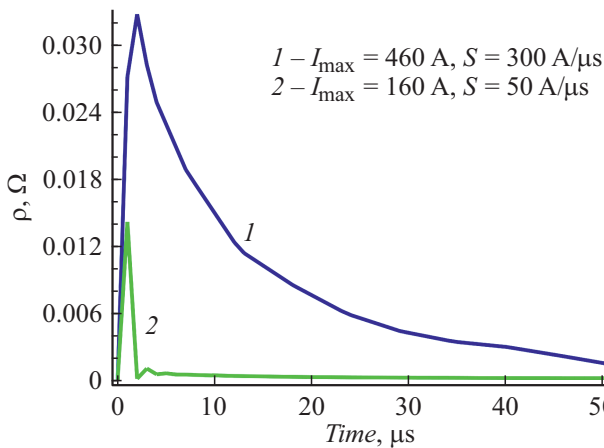
$$\rho_{HTS}(J, T) = \frac{V_{meas}(t)}{J_{HTS}(T(t))} \frac{S_{HTS}}{l}. \tag{4}$$

Следует отметить, что в рамках данного модельного представления рост температуры при протекании тока через несверхпроводящие слои приводит к увеличению сопротивления этих слоев и снижению величины тока, протекающего через них. В таком случае ток через ВТСП-слой эффективно увеличится (см. уравнение (3)). Это приведет к тому, что сопротивление ВТСП-слоя, рассчитанное в соответствии с выражением (4), будет тем меньше, чем больше величина тока, протекающего через сверхпроводник. Этот эффект не вызывает значительной ошибки в тех случаях, когда основная часть токов протекает в сверхпроводящем слое, а толщина стабилизирующих слоев невелика, как это было в работе [10]. В нашем случае при наличии массивного медного слоя, способного переносить при криогенных температурах достаточно высокие токи, необходимо вводить поправочный коэффициент для сопротивления ВТСП-слоя. В связи с этим в рамках модели в области ВТСП-слоя вводится дополнительный объемный источник тепла, мощность тепловыделения в котором пропорциональна величине гистерезисных потерь в ВТСП-слое во время нарастания импульса и реальному сопротивлению слоя [10,11]. Описанный алгоритм был реализован с использованием модуля Heat Transfer in Solids программного пакета Comsol Multiphysics. Ввиду того что геометрия системы воспроизводит реальную архитектуру ВТСП-ленты, при создании конечно-элементной сетки использованы специальные механизмы адаптации, такие как многомасштабное структурирование и протяжка сетки через тонкие слои ВТСП-ленты [12].

Проведем анализ процессов перераспределения токов между слоями ВТСП-ленты на примере более жесткого режима нагрузки, для которого неравновесные процессы наиболее выражены. На рис. 2 приведены зависимости тока во всех слоях ВТСП-ленты от времени в течение всего импульса (*a*) и в течение нарастания токового



**Рис. 2.** Зависимости тока во всех слоях ВТСП-ленты от времени в течение всего импульса (а) и в течение нарастания токового фронта (б).



**Рис. 3.** Динамическое сопротивление ВТСП-слоя композитной ленты в жестком (амплитуда импульса 460 А ( $\sim 3I_c$ ), скорость ввода тока 300 А/μs) и мягком (амплитуда импульса 160 А ( $\sim I_c$ ), скорость ввода тока 50 А/μs) режимах нагрузки. Длительность импульса 50 μs.

фронта (б). Отметим, что на рис. 2, а в начале приложения импульса имеются ярко выраженные особенности, связанные с процессами перераспределения токов и установлением равновесного состояния в системе. При более детальном рассмотрении временного промежутка,

связанного с нарастанием токового фронта (рис. 2, б), можно увидеть, что вплоть до того момента, пока величина тока не достигла значения критического тока ВТСП-ленты, весь ток протекает в сверхпроводящем слое. Затем ток появляется в медном слое, выполняющем стабилизирующую функцию. Слой серебра ввиду малой толщины переносит лишь очень малую часть токов, а слой подложки не участвует в процессах перераспределения токов между слоями ленты ввиду своей низкой проводимости. Кроме того, с использованием разработанного подхода возможно определение динамического сопротивления ВТСП-слоя ленты, которое может быть интегрировано в модели с электрической схемой для расчета параметров устройств, в цепи которых имеются сверхпроводящие элементы. Динамическое сопротивление ВТСП-слоя ленты в течение токового импульса длительности 50 μs для жесткого и мягкого режимов нагрузки приведено на рис. 3. Отметим, что рассчитанное сопротивление не является общей характеристикой материала, а имеет место лишь при заданных условиях воздействия. Поэтому данное расчетное сопротивление ВТСП-слоя может быть использовано лишь для расчета устройств, работающих в аналогичных режимах нагрузки.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность пропускания через ВТСП-ленту импульсного тока с амплитудой, превышающей критический ток ленты в 3 раза, без деградации характеристик сверхпроводника. При этом наблюдается переключение в резистивное состояние, сохраняющееся вплоть до окончания действия импульса. Моделирование нестационарных процессов продемонстрировало динамику перераспределения токов между слоями. Показано, что с использованием разработанной модели возможно определение критического тока и динамического сопротивления ВТСП-слоя. Полученные данные могут быть использованы при конструировании быстродействующих переключающих устройств на основе высокотемпературных сверхпроводящих композитов. Отметим, что экспериментальные данные, представленные в настоящей работе, были получены с использованием ВТСП-лент с высокой степенью однородности критического тока. Расчетная модель также рассматривает случай полной однородности характеристик слоев лент и идеальный термический и электрический контакт между ними. Однако наличие межзеренных границ и температурной нестабильности магнитных потоков может существенно повлиять на процессы переключения в случае сильно неоднородных ВТСП-слоев [13]. Кроме того, отдельного внимания заслуживают вопросы стабилизации лент при импульсных токовых воздействиях и влияния процессов перераспределения тепла в слоях [6,14]. Экспериментальное и численное изучение этих вопросов является предметом последующих исследований.

## Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 17-29-10024, а также научного проекта № 20-38-90144 (И.В. Анищенко) по конкурсу „Аспиранты“.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] K. Sawa, M. Suzuki, M. Tomita, M. Murakami, *IEEE Trans. Components Packaging Technol.*, **25**, 415 (2002). DOI: 10.1109/TCAPT.2002.804605
- [2] D. Park, K. Chang, S. Yang, Y.J. Kim, M. Ahn, Y.-S. Yoon, H. Kim, J.-W. Park, T. Ko, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19**, 1896 (2009). DOI: 10.1109/TASC.2009.2018069
- [3] S.B. Kim, M. Takahashi, R. Saito, Y.J. Park, M.W. Lee, Y.K. Oh, *H.S. Ann, Phys. Procedia*, **65**, 149 (2015). DOI: 10.1016/j.phpro.2015.05.088
- [4] S. Lee, V. Petrykin, A. Molodyk, S. Samoilenkov, A. Kaul, A. Vavilov, V. Vysotsky, S. Fetisov, *Supercond. Sci. Technol.*, **27**, 044022 (2014). DOI: 10.1088/0953-2048/27/4/044022
- [5] I.V. Anischenko, S.V. Pokrovskii, I.A. Rudnev, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1686**, 012041 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1686/1/012041
- [6] L. Antognazza, M. Decroux, M. Therasse, M. Abplanalp, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **21**, 1213 (2011). DOI: 10.1109/TASC.2010.2100351
- [7] N. Riva, S. Richard, F. Sirois, C. Lacroix, B. Dutoit, F. Grilli, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **29**, 6601705 (2019). DOI: 10.1109/TASC.2019.2902038
- [8] M.-H. Shi, J. Ma, B.-X. Wang, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **36**, 4461 (1993). DOI: 10.1016/0017-9310(93)90130-X
- [9] С.В. Самойленков, В.И. Щербаков, Д.Р. Кумаров, Д.А. Горбунова, *Письма в ЖТФ*, **46** (1), 28 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.01.48860.18047
- [10] В.В. Зубко, С.С. Фетисов, *Кабели и провода*, № 1 (369), 3 (2018). <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32581263>
- [11] В.А. Мальгинов, *Письма в ЖТФ*, **45**(22), 7 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.22.48640.17822
- [12] V.M. Rodriguez-Zermeno, N. Mijatovic, C. Traeholt, T. Zirngibl, E. Seiler, A.B. Abrahamsen, N.F. Pedersen, M.P. Sorensen, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **21**, 3273 (2011). DOI: 10.1109/TASC.2010.2091388
- [13] A.V. Bobyl, D.V. Shantsev, T.H. Johansen, M. Baziljevich, Y.M. Galperin, M.E. Gaevski, *Supercond. Sci. Technol.*, **13**, 183 (2000). DOI: 10.1088/0953-2048/13/2/312
- [14] F. Sirois, J. Coulombe, A. Bernier, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **19**, 3585 (2009). DOI: 10.1109/TASC.2009.2018304