
МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ
ДЛЯ НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

УДК 538.945

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИТАХ ПРИ КРИТИЧЕСКИХ ТОКОВЫХ НАГРУЗКАХ

© 2025 г. И. В. Мартиросян^а, И. К. Михайлова^{а, *},
А. Ю. Малявина^а, С. В. Покровский^а, И. А. Руднев^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*E-mail: ikmikhailova@mephi.ru

Поступила в редакцию 08.08.2023 г.

После доработки 11.08.2023 г.

Принята к публикации 14.08.2023 г.

Аннотация — В данной работе представлены результаты исследований неравновесных состояний в ленточных высокотемпературных сверхпроводниках при импульсной токовой нагрузке. Для исследования переходных процессов в сверхпроводнике при критических токовых нагрузках разработана методика и создан экспериментальный стенд, позволяющий выполнять визуализацию тепловых процессов в композите при критических токовых нагрузках с высоким временным разрешением. Исследована динамика тепловых процессов в ВТСП ленте при токовых нагрузках, показаны особенности тепловых процессов, приводящих к смене режимов кипения жидкого хладагента. Изучен процесс разрушения ВТСП образца под действием сверхкритической токовой нагрузки на миллисекундном масштабе.

Ключевые слова: ВТСП ленты, критический ток, импульсные токовые нагрузки, динамика тепловых процессов

DOI: 10.56304/S2079562923030260

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач физики твердого тела является исследование неравновесных состояний в сверхпроводящих композитах. Перспективы применения высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) обусловлены их высокими критическими характеристиками и возможностью применения в качестве хладагента жидкого азота. В настоящее время на смену традиционным объемным ВТСП материалам пришли ленточные ВТСП композиты, которые обладают более высоким критическим током по сравнению с объемными ВТСП. Экспериментальные исследования неравновесных состояний в ВТСП, как правило, связаны с измерением их магнитных и транспортных свойств в различных условиях охлаждения и токовой нагрузки. Наиболее распространенными методами исследования магнитных свойств композитов являются такие методики, как сканирующая холловская магнитометрия [1, 2], низкотемпературная магнитооптическая визуализация [3], измерение петель намагничивания [4]. Исследование транспортных свойств ВТСП образцов выполняется, как правило, при помощи измерения их вольт-амперных характеристик (ВАХ) [5]. Такой подход позволяет получить усредненную информацию о физическом состоянии образца, но не

позволяет получить представление о локальных тепловых нестабильностях образца, связанных с выделением тепла при росте тока из-за нелинейной вольт-амперной характеристики ВТСП [6] и возможной неоднородностью характеристик образца.

Наиболее перспективным является методом исследования поведения сверхпроводника при надкритических (то есть с амплитудой импульсного тока, превышающей значение критического тока) токовых нагрузках является метод импульсного воздействия. При импульсном воздействии, в зависимости от длительности импульса наблюдается задержка роста напряжения на образце, а также может присутствовать значительное повышение критического тока, при котором наблюдается деградация образца [7].

Определяя корреляцию между транспортным током при импульсном воздействии и критическим током в стационарном режиме, можно получать информацию о критическом токе без деградации самого образца, так как значения критического тока в импульсном режиме в несколько раз превышают критические параметры в стационарном режиме [8]. Существуют исследования критических параметров при микросекундных временах импульсного воздействия [7, 8], особый интерес представляют субмикросекунд-

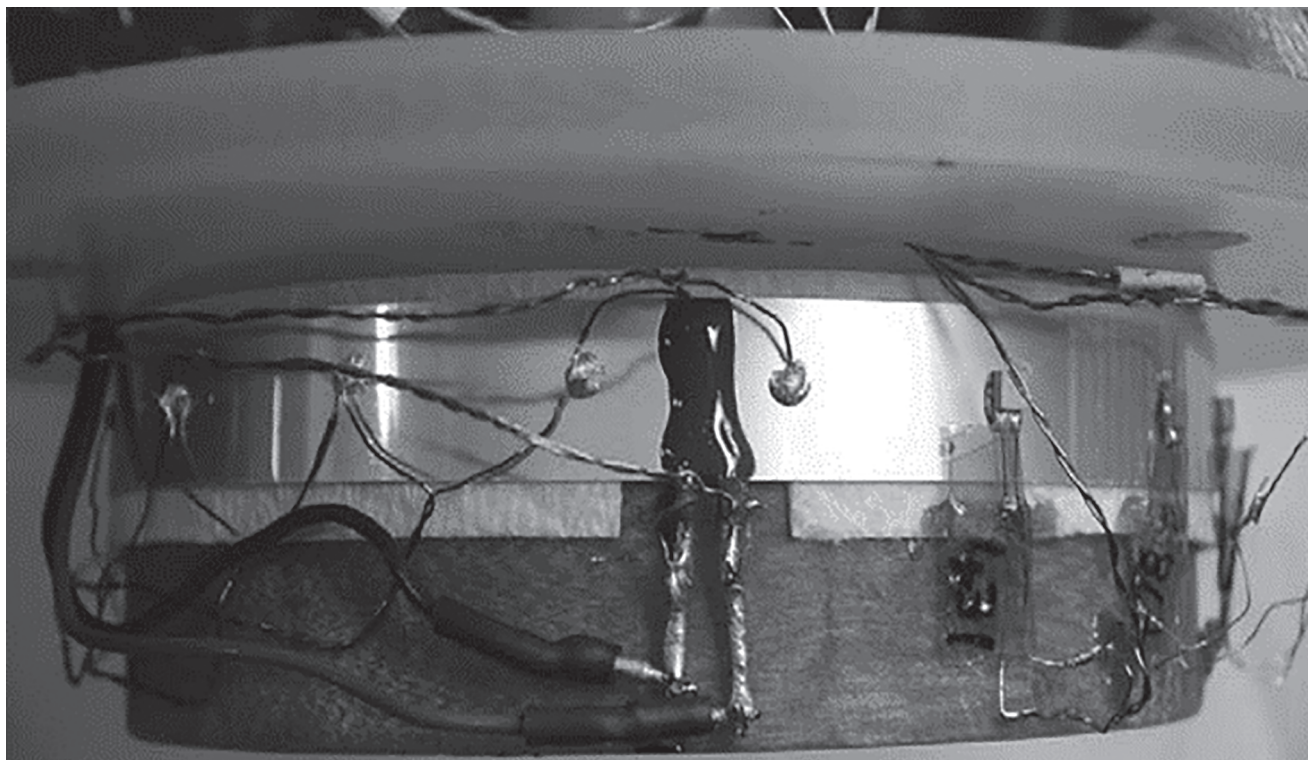


Рис. 1. Образец YBCO закрепленный в держателе. Нагреватель находится в середине проводника и залит эпоксидной смолой.

ные длительности импульса, так как именно в этом диапазоне находятся времена релаксации нестационарных процессов в сверхпроводниках [9]. Сложность снятия вольт-амперных характеристик в таком временном диапазоне обусловлена необходимостью создания субмикросекундного источника тока с малой индуктивностью. Исследование импульсного режима воздействия при различных температурах, а также учет влияния магнитного поля на критические токовые характеристики при импульсном воздействии, также является востребованной задачей.

Исследование локальных тепловых процессов, возникающих в сверхпроводящих лентах при критических токовых нагрузках, может быть выполнено с использованием высокоскоростной съемки. В литературе представлены публикации, в которых изучаются фазы кипения хладагента с помощью высокоскоростной фотосъемки [10, 11]. Данный метод позволяет делать выводы о количестве тепла выделяющемся на образце, путем непосредственного учета движения пузырьков жидкости.

Помимо визуализации тепловых процессов в сверхпроводниках, высокоскоростная съемка позволяет рассчитывать скорость распространения нормальной зоны. Поведение нормальной зоны, при локальных тепловых возмущениях, является важной характеристикой сверхпроводника, так как

это напрямую связано с его стабильностью. Одним из методов исследования скорости распространения нормальной зоны является прямой нагрев сверхпроводника [12]. К ВСТП ленте подключают нагреватель, и на некотором расстоянии от него располагают датчики температуры, как представлено на рис. 1. Получая изображение с камеры, и, наблюдая распространением теплового пятна на поверхности образца, можно рассчитывать скорость распространения нормальной зоны.

ВТСП обладают низкой скоростью распространения нормальной зоны по сравнению с низкотемпературными сверхпроводниками [13], из-за чего локальный нагрев может привести к деградации сверхпроводника. Спонтанный процесс перехода сверхпроводника из сверхпроводящего состояния в нормальное называется квенчем, и может происходить, например, из-за локального повышения температуры. Если по сверхпроводнику течет сверхпроводящий ток, то при таком переходе будет выделяться огромное количество тепла, что может привести к возгоранию сверхпроводника.

Поэтому, защита от перехода в квенч является востребованной задачей в физике сверхпроводников. При переходе в нормальное состояние на сверхпроводнике начинается рост напряжения, этот факт можно использовать для раннего обнаружения локального перехода.

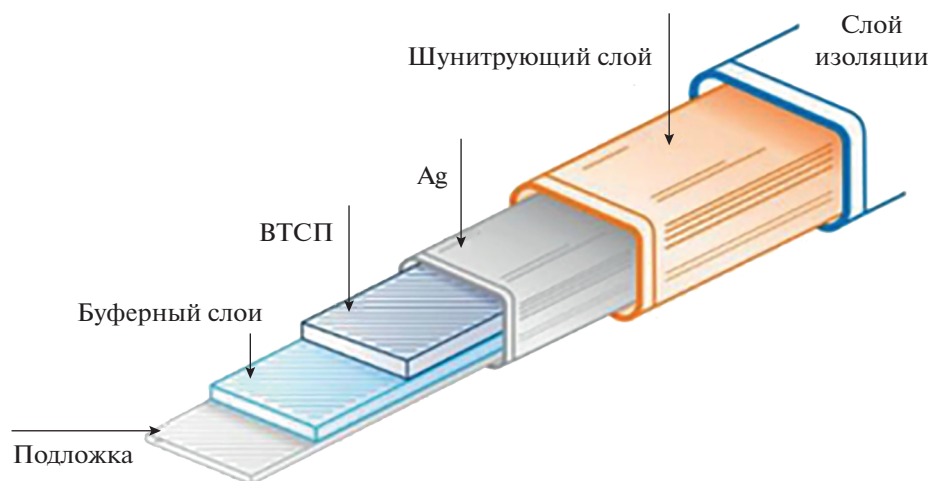


Рис. 2. Структура ВТСП-ленты 2 поколения компании СуперОкс.

В данной работе представлена экспериментальная методика и полученные с ее помощью новые экспериментальные результаты, которая позволяет визуализировать локальные тепловые процессы, происходящие в сверхпроводящих композитах при импульсных токовых нагрузках, а также тепловые процессы, связанные с изменениями параметров кипения жидкого хладагента.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Образец для исследования

В качестве образца использовалась ВТСП лента $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) второго поколения производства компании С-Инновации. Сверхпроводящая лента представляет собой композитную структуру представленную на рис. 2, чья архитектура включает более 10 слоев, в том числе металлическую подложку сплава Hastelloy (0.1 мм), ВТСП слой YBCO (1 мкм), буферные и защитные слои (Al_2O_3 , MgO и др.) толщиной в общей сложности 120 нм, слои меди (30 мкм) и серебра (3 мкм).

Ширина ленты 4 мм, длина 10 см. Критический ток ленты в собственном поле при температуре кипения жидкого азота равен 140 А. Критическая температура была также измерена экспериментально и составила 92 К.

Для определения предварительных характеристик образца была проведена бесконтактная диагностика локальных дефектов критического тока ленты с использованием метода сканирующей холловской магнитометрии. Измеряя магнитное поле, захваченное образцом, можно определить критический ток решая обратную задачу для уравнения Био—Савара—Лапласа. Трехмерное распределения магнитного поля в образце приведено на рис. 3.

Исходя из результатов холловского сканирования, можно сделать вывод, что магнитное поле в

образце распределено равномерно, хотя и присутствуют области с пониженными значениями поля. В этих областях будет наблюдаться локальное понижение критического тока.

Экспериментальный стенд

Для визуализации тепловых процессов, происходящих в ВТСП композитах при импульсном токовом воздействии использовалась высокоскоростная камера Evercam F 1000-4-M способная производить запись быстропротекающих процессов со скоростью до 3500 кадров в секунду при разрешении 2.1 Мп ($1920 \cdot 1088$) и до 29000 кадров в секунду при минимальном разрешении.

Для исследования неравновесных процессов в сверхпроводящем образце при импульсном токовом воздействии был собран экспериментальный стенд, представленный на рис. 4. ВТСП лента (1) помещается в криостат с жидким азотом (2). Через образец пропускается ток, задаваемый импульсным источником тока (300 А, 3В) (3) и снимается напряжение на образце с помощью нановольтметра Agilent 34420 (4). Над криостатом расположена высокоскоростная камера Evercam (5), способная снимать до 29 тысяч кадров в секунду при минимальном разрешении, а также защитное стекло и осветительный прожектор (6), необходимый для улучшения качества съемки. На стенде также находится расчетно-измерительный комплекс, используемый для предварительной обработки результатов (7). Положение образца в криостате и интерфейс программы управления и обработки данных приведены на рис. 5.

Импульсное воздействие

Через образец пропускается импульсный ток, который увеличивается с шагом в 3 А, в диапазоне

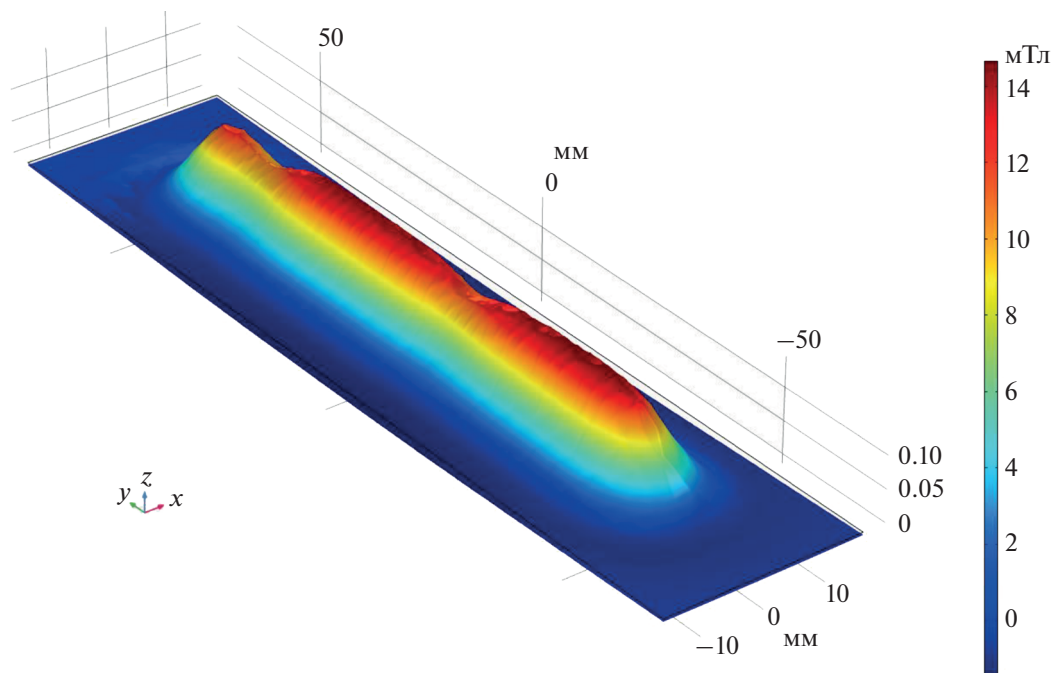


Рис. 3. Трехмерное распределение захваченного магнитного поля в ВТСП-ленте, полученное с помощью сканирующей холловской магнитометрии.

[0; 150] А. Таким образом, время нарастания фронта воздействия составило 10 с. Съемка протекающего процесса производилась со скоростью 100 кадров в секунду. При токе 138 А наблюдается пузырьковое кипение жидкости, что показано на рис. 6а, далее будет показано, что при этом токе началось образование точечного теплового пятна в образце. Бурное кипение связано со всплеском тепловыделения в образце, которое при транспортном токе 143 А привело к перегоранию образца, что видно на рис. 6б. Далее кипение хладагента, как и развертка транспортного тока, прекратились после полного перегорания ленты при токе 144 А.

Стоит отметить, что перегорание ВТСП ленты произошло на расстоянии приблизительно 10 мм от ее края, где, исходя из данных, полученных методами холловской магнитометрии, присутствовал микродефект ВТСП слоя и критический ток был понижен в сравнении с другими областями образца, что указывает сравнение правой (фотографии образца после перегорания) и левой части (результаты холловской магнитометрии) рис. 7.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ НОРМАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Тепловые процессы, происходящие в ВТСП ленте при токовых нагрузках, наблюдались с помощью высокоскоростной камеры. Раскадровка изображений приведена на рис. 8. В момент 0.21 с после начала развертки тока ($I \sim 138$ А) начинается

точечное зарождение теплового пятна. Кипение хладагента усиливается и границы образца на снимках становятся более размытыми. Затем размер теплового пятна распространяется поперек ленты на всю ширину и его яркость существенно увеличивается за 20 мс.

Возгорание длится до момента 0.35 с.

Когда на образце при протекании тока начинает выделяться тепло, с поверхности образца тянутся пузырьковые нити, при увеличении тепловыделения нити сливаются и, в итоге, образуют газовую прослойку вокруг образца. В этот момент теплоотвод сильно ухудшается, так как нет прямого контакта хладагента с поверхностью образца. Это приводит к дополнительному нагреву образца и смене режимов кипения с пленочного на активное пузырьковое кипение и параметры теплоотвода улучшаются и горение прекращается. В момент времени 0.44 с горение и кипение прекратилось, но из-за того, что ток продолжает увеличиваться, нагрев образца возобновляется, что приводит к дальнейшему перегоранию при токе 144. Весь процесс с момента зарождения теплового пятна до полного разрыва цепи (т.е. до перегорания ВТСП ленты) достаточно длительный и занял 410 мс.

Скорость распространения нормальной зоны т.е. скорость распространения теплового пятна составила 37–47 мм/с, что согласуется с другими литературными данными [12].



Рис. 4. Внешний вид экспериментального стенда: 1 – ВТСП лента; 2 – криостат с жидким азотом; 3 – импульсный источник тока; 4 – нановольтметр; 5 – высокоскоростная камера Evercam; 6 – осветительный прожектор; 7 – контрольный монитор.

Знание скоростей движения нормальной зоны позволяет прогнозировать появления квенча и проектировать систему защиты. При надкритических импульсных нагрузках возможен переход сверхпроводящего образца в нормальное состояние. Наблюдается два возможных режима переключе-

ния: обратимый и необратимый, вольт-амперные характеристики которых представлены на рис. 9.

Необратимое переключение характеризуется продолжающимся ростом напряжения на образце при поддержании постоянной токовой нагрузки, а обратимое – снижением напряжения на образце во время приложения токового импульса. На необратимость режима влияет амплитуда импульса, а также скорость ввода тока. Если тепло успевает распространяться по сверхпроводнику или теплоотвод от образца достаточно эффективный, переход будет обратимым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлена экспериментальная методика, которая позволяет визуализировать локальные тепловые процессы, происходящие в сверхпроводящих композитах при импульсных токовых нагрузках, а также тепловые процессы, связанные с изменениями параметров кипения жидкого хладагента. Представлены результаты исследований визуализации тепловых процессов, происходящих в жидком азоте и в ВТСП ленте при приложении к образцу транспортного подкритического тока, показаны особенности тепловых процессов, приводящих к смене режимов кипения азота, детально изучен процесс разрушения сверхпроводящего образца под действием сверхкритической токовой нагрузки и связанных с ним процессов, наблюдающихся в криогенной жидкости. Определена скорость распространения нормальной зоны.

Полученные результаты имеют практическую значимость при проектировке систем с использованием ВТСП, в которых наблюдаются быстрые

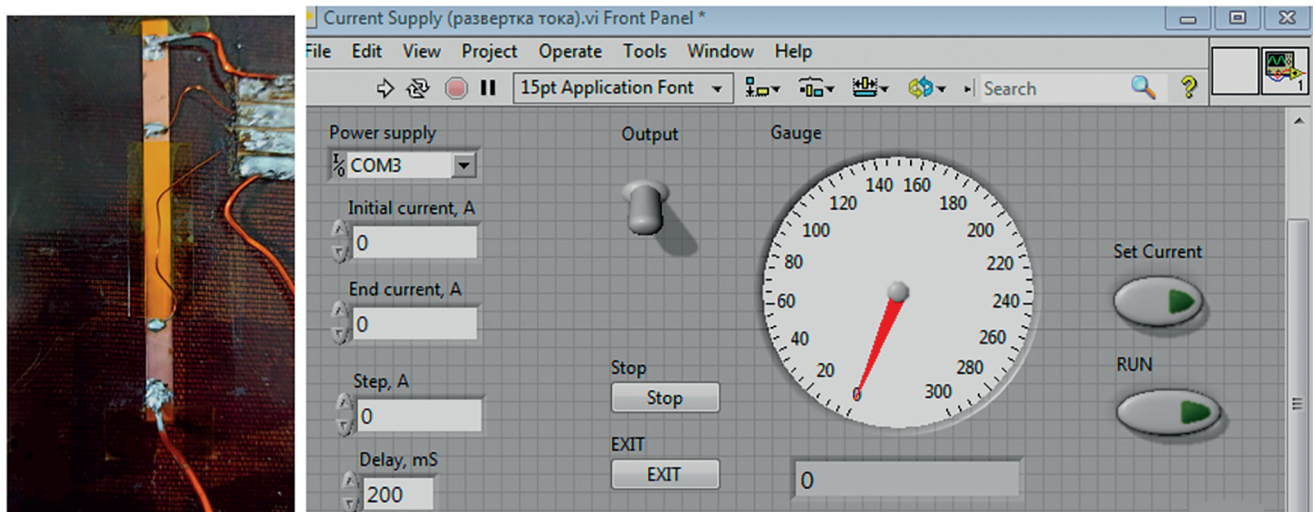


Рис. 5. Слева – ВТСП лента, подготовленная для проведения эксперимента. Справа – интерфейс программы управления экспериментом.

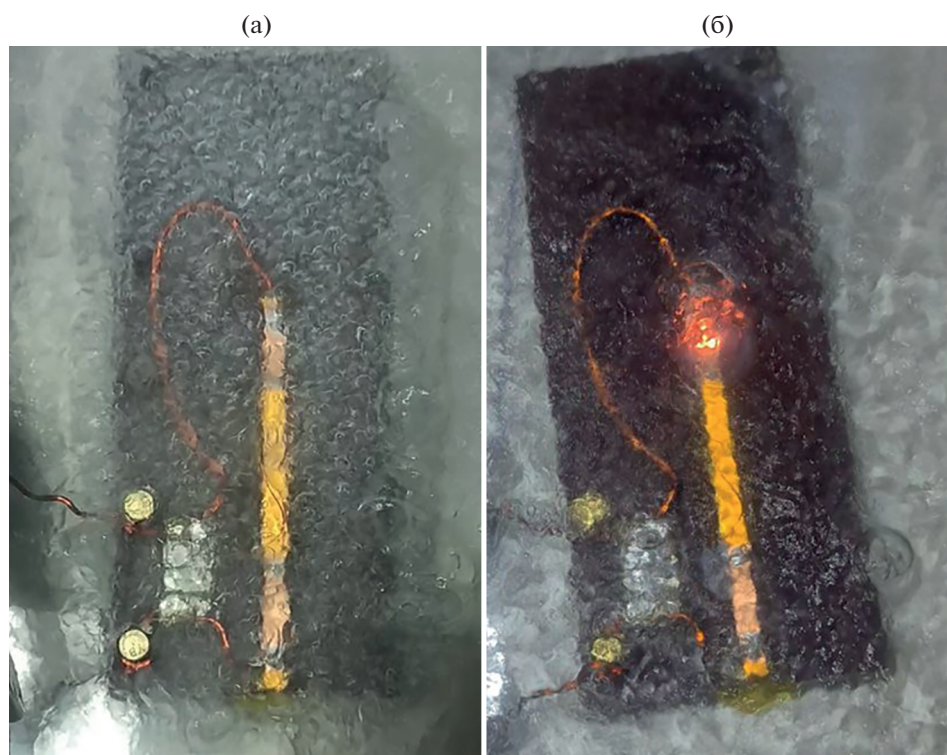


Рис. 6. Образец в жидком азоте при протекании транспортного тока: (а) 138 А; (б) 143 А.

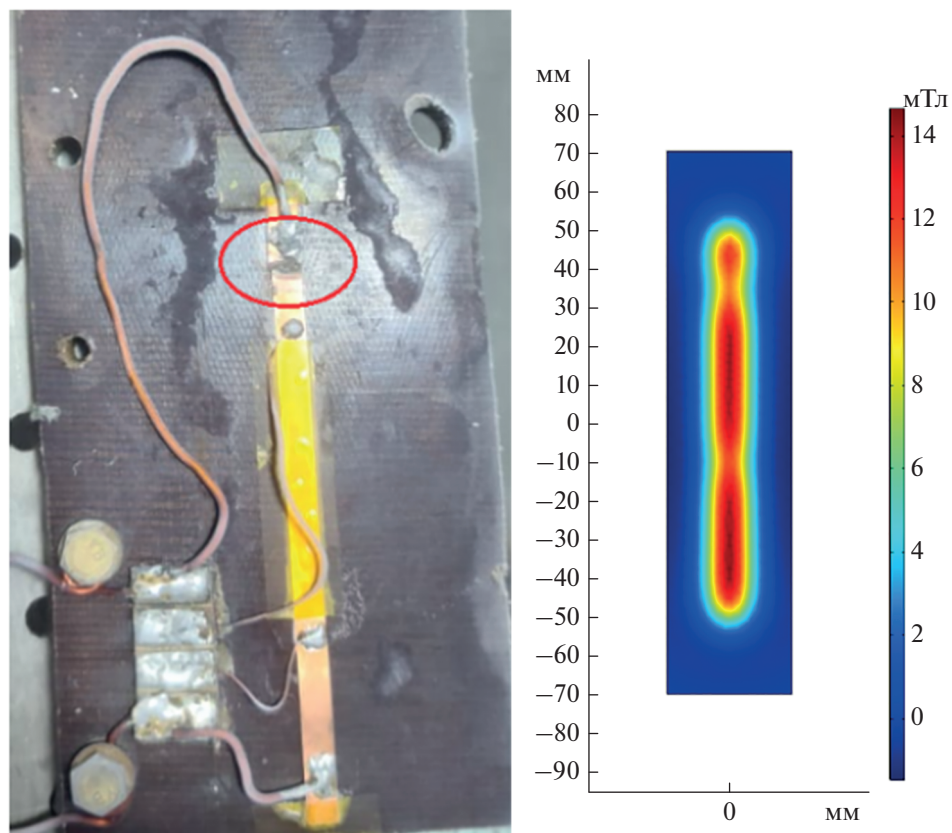


Рис. 7. Слева—фотография образца после приложения токовой нагрузки. Справа —двумерное распределение захваченного магнитного поля в ВТСП ленте до приложения токовой нагрузки.

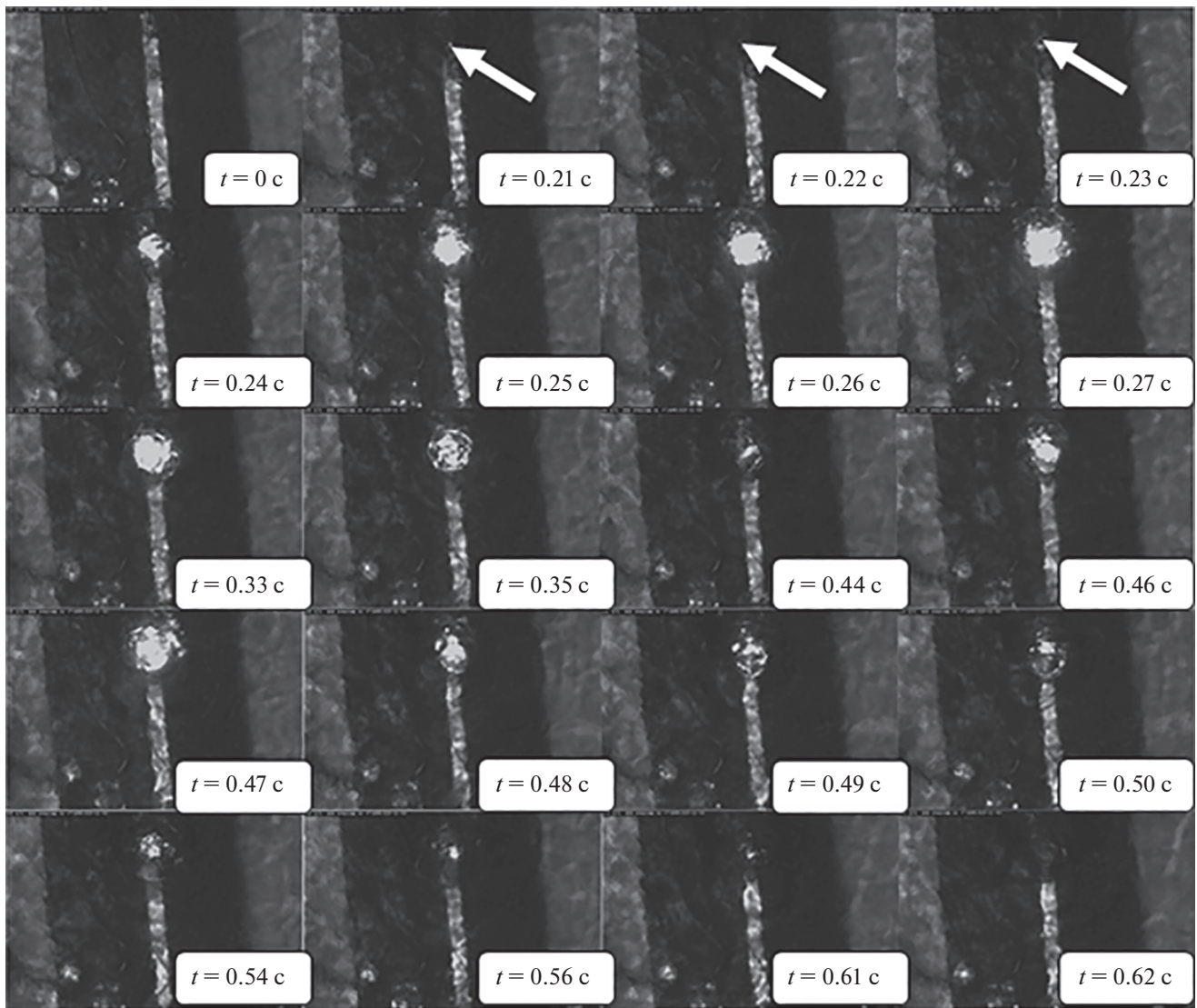


Рис. 8. Эволюция теплового пятна во времени, снятая на высокоскоростную камеру.

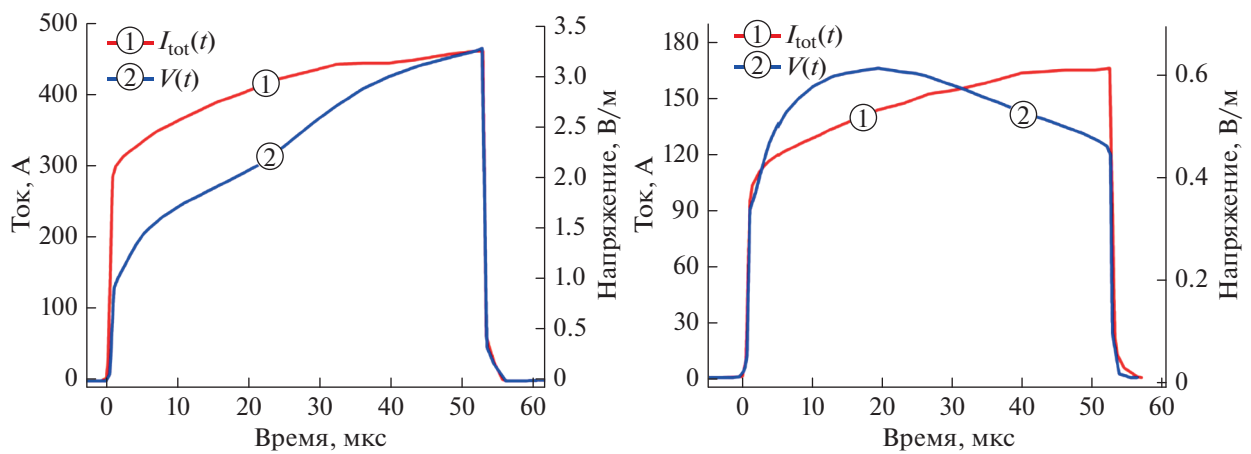


Рис. 9. Экспериментальные зависимости тока и напряжения в ВТСП ленте [8]. Слева – необратимый режим, справа – обратимый режим переключения.

токовые процессы: токоограничители, переключатели, коммутаторы тока. Также данные по распространению нормальной зоны могут быть полезны для расчета и конструирования устройств, в которых наблюдается сильный нагрев ВТСП ленты, например в высокоскоростных сверхпроводящих подшипниках.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2021-1352.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Fujisawa T. et al.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2015. V. 54 (4). P. 048001.
2. *Oral A. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69 (9). P. 1324.
3. *Baziljevich M. et al.* // Phys. C: Supercond. 1996. V. 266 (1–2). P. 127.
4. *Sanchez A., Navau C.* // Supercond. Sci. Technol. 2001. V. 14 (7). P. 444.
5. *Zhukov A.A. et al.* // Cryogenics. 1993. V. 33 (1). P. 142.
6. *Gurevich A., Friesen M.* // Phys. Rev. B. 2000. V. 62 (6). P. 4004.
7. *Покровский С.В. и др.* // Ядерная физика и инжиниринг. 2019. Т. 10 (6). С. 543–548 [*Pokrovskii S.V. et al.* // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 1503].
8. *Anischenko I.V. et al.* // Pisma Zh. Tekh. Fiz. 2021. V. 47 (19). P. 22.
9. *Mannhart J.* // Supercond. Sci. Technol. 1996. V. 9 (2). P. 49.
10. *Li X. et al.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 52 (5–6). P. 1510.
11. *Sakurai A. et al.* // Nucl. Eng. Des. 2000. V. 200 (1–2). P. 39.
12. *Trillaud F. et al.* // Cryogenics. 2003. V. 43 (3–5). P. 271.
13. *Laquer H.L. et al.* // IEEE Trans. Magn. 1989. V. 25 (2). P. 1516.

Visualization of Thermal Processes in Superconducting Composites Under Critical Current Loads

I. V. Martirosyan¹, I. K. Mikhailova^{1, *}, A. Y. Malyavina¹,
S. V. Pokrovskii¹, and I. A. Rudnev¹

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: ikmikhailova@mephi.ru*

Received August 8, 2023; revised August 11, 2023; accepted August 14, 2023

Abstract—This paper presents the results of studies of non-equilibrium states in ribbon high-temperature superconductors under pulse current loading. To study transient processes in a superconductor at critical current loads an experimental stand was developed, which allows to perform visualization of thermal processes in the composite at critical current loads with high temporal resolution. The dynamics of thermal processes in HTS tape under current loads was investigated, the peculiarities of thermal processes leading to the change of liquid refrigerant boiling modes were shown. The process of HTS sample fracture under supercritical current load was studied on a millisecond scale.

Keywords: HTS tapes, critical current, critical temperature, pulse current loads, dynamic of thermal processes