

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 538.955

ВЛИЯНИЕ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ НА ТРАНСПОРТНЫЕ И ЛЕВИТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ЛЕНТОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

© 2022 г. М. А. Осипов^а, Д. А. Абин^а, С. В. Покровский^а,
А. С. Стариковский^а, И. В. Анищенко^{а, *}, С. В. Веселова^а, И. А. Руднев^а

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: mephizic@gmail.com

Поступила в редакцию 08.12.2020 г.

После доработки 13.01.2021 г.

Принята к публикации 03.08.2021 г.

В работе представлены результаты исследований влияния на критический ток и левитационные характеристики механического одноосного сжатия образцов высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) ленточных композитов, являющихся перспективным материалом для создания систем на основе магнитной левитации. Сжатие происходило в направлении перпендикулярном плоскости ленты. Давление варьировалось от 0 до 695 МПа, что соответствует силе воздействия в 10 кН на стопку из квадратных фрагментов ВТСП ленты со стороной 12 мм. Как для отдельных лент, так и для стопок из трех и пяти лент были выполнены измерения зависимости критического тока от приложенного давления. Для стопки из 50 лент проведено исследование влияния сжатия на силу левитации. Для анализа полученных экспериментальных результатов была разработана расчетная модель на основе метода конечных элементов, реализованная с использованием пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. Показано, что при однородном сжатии отдельной ленты и стопок лент небольшой толщины (до 5 лент), деградации характеристик ВТСП-ленты происходит преимущественно на границе области воздействия, что вызвано наличием деформаций изгиба. Вне границ воздействия не было обнаружено деградации критического тока и силы левитации ВТСП-лент при давлениях до 695 МПа. Однако при сдавливании больших стопок лент (50 шт.), хотя граница сжатия и отсутствует, происходит неоднородная деформация слоев ленты, что может быть вызвано локальными изгибными деформациями, обусловленными флуктуациями как формы лент, так и толщины слоев в отдельных лентах. Это вызывает линейное по давлению, падение силы левитации.

Ключевые слова: ВТСП, метод конечных элементов, критический ток, левитация, стопки ВТСП-лент

DOI: 10.56304/S2079562922010304

ВВЕДЕНИЕ

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) на основе соединения $REBa_2Cu_3O_{7-x}$ (RE — редкоземельный элемент) широко применяются не только для создания энергоэффективных электрических устройств, но и системах на основе магнитной левитации, таких как левитационный транспорт, сверхпроводящие подшипники, кинетические накопители энергии, моторы и генераторы [1–5].

Развитие технологии создания лент с покрытием REBCO (высокотемпературные сверхпроводящие ленты — ВТСП-ленты) в последние годы позволяет использовать их как альтернативу объемным сверхпроводникам [6]. Наличие металлической подложки обеспечивает более высокую термическую и механическую стабильность, а характеристики левитации стопки лент сопостави-

мы с объемными ВТСП [6–8]. Физические и механические свойства, а также высокая коммерческая доступность СС-лент делают стопки СС-лент привлекательной альтернативой объемным ВТСП в сверхпроводящих левитационных системах.

В последние годы был проведен ряд исследований по использованию стопок СС-лент в системах левитации. На данный момент проведены разнообразные исследования в области создания левитационных подвесок [6, 9–13] и двигателей [14], влияния количества и конфигурации элементов в стопке на вертикальную [15] и боковые [7, 8] составляющие силы левитации, влияние характеристик СС-ленты на силу левитации [16]. Были исследования левитационных характеристик сверхпроводящих подшипников на основе СС-лент с различными методами сборки лент в композитный цилиндрический сверхпроводник [17–18].

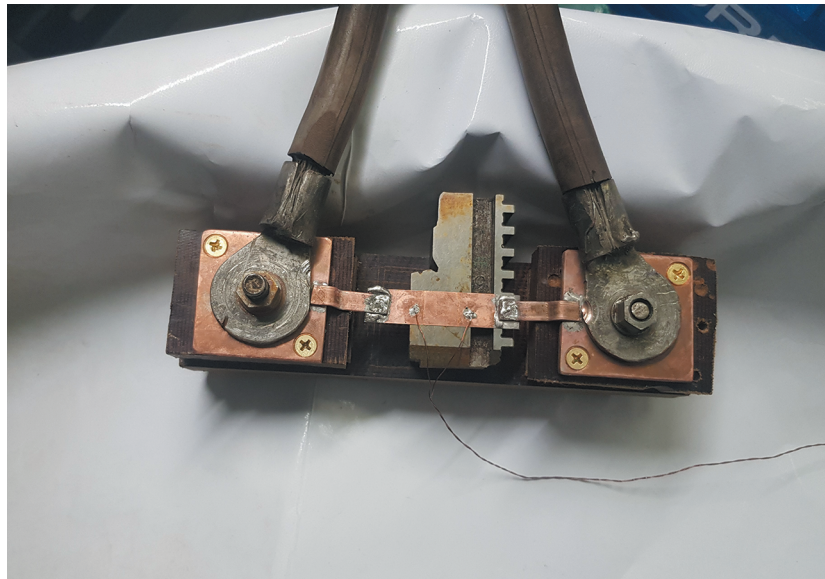


Рис. 1. Держатель образца с установленной ВТСП лентой.

Разработка левитационного подвеса оптимальной конструкции требует знания информации о левитационных свойствах лент, влиянии способов их укладки и конфигурации постоянных магнитов на левитационные свойства лент, а также влияния на левитационные характеристики лент различных внешних факторов. Одним из таких факторов является внешнее механическое давление.

В левитационных системах стопки лент подвергаются различным усилиям сжатия, вызванных как непосредственно давящим на них грузом, так и системой фиксации стопок. Сжимающие усилия могут приводить к повреждению сверхпроводящего слоя и деградации критического тока, что, в свою очередь, приводит к снижению силы левитации.

Вопрос влияния усилия сжатия на критический ток современных ВТСП-лент мало изучен. В работе 2007 г. [19] было проведено исследование влияния давления на критический ток лент. Лента зажималась между текстолитовой пластиной и металлической головкой, ширина которой составляла от 0.5 до 2 мм. Была обнаружена деградация критического тока при давлениях более 300 МПа. Однако данный эффект может быть объяснен не сжатием ВТСП-слоя, а его изгибной деформацией, вызванной деформацией слоя текстолита под образцом. Помимо этого, эксперименты проведены на устаревших на данный момент ВТСП-лентах. Поэтому необходимо провести новые исследования влияния поперечного сжатия на критический ток ВТСП-лент.

В настоящей работе представлены новые данные, характеризующие влияние одноосного сжатия на критический ток современных ВТСП лент,

а также впервые приводятся и обсуждаются результаты влияния сжатия на левитационные характеристики стопки ВТСП лент.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения влияния усилия сжатия на критический ток была собрана установка по измерению вольт-амперных характеристик ВТСП-лент, подвергнутых сжатию гидравлическим прессом. Лента помещалась в держатель образца (рис. 1), измерение вольт-амперных характеристик осуществлялось четырех-контактным методом. Под ленту помещалась пластина из нержавеющей стали, сверху располагалась давящая головка из нержавеющей стали, шириной 12 мм. Держатель образца помещается в жидкий азот, а на давящую головку сверху давит пресс (рис. 2). Установка позволяет развивать усилие в 10 тонн, что соответствует давлению на ВТСП-ленту в 695 МПа.

Образец № 1 сжимался между двумя прочными пластинами из нержавеющей стали. График зависимости критического тока от давления представлен на рис. 3. Из графика видно, что деградация критического тока составляет менее 10 процентов при давлениях 695 МПа, что соответствует усилию 10 т на ленту $12 \times 12 \text{ мм}^2$. Однако в реальных системах таких давления не достигаются. Сила, действующая на единичную стопку $12 \times 12 \text{ мм}^2$ обычно сравнима с силой левитации стопки и составляет несколько Ньютонов.

Тем не менее, следует учитывать, что в реальных левитационных системах сдавливаются не отдельные ленты, а стопки лент, причем отдельные ленты находятся не между пластинами из не-



Рис. 2. Внешний вид установки для измерения критического тока ВТСП лент под давлением.

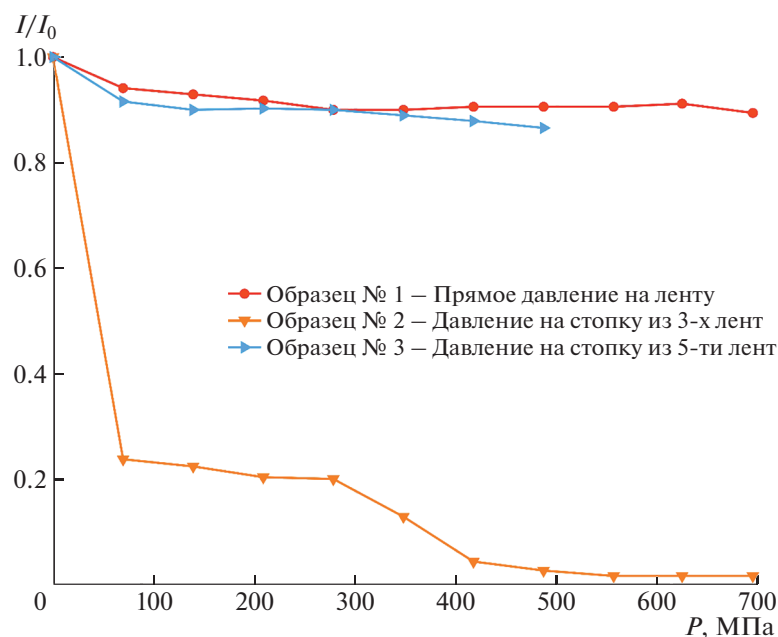


Рис. 3. Зависимость критического тока ленты от приложенного давления. Температура измерения – 77.4 К. Приведены результаты для случая сдавливания стопки между двумя пластинами из нержавеющей стали и сдавливания стопки лент.

ржавеющей стали, а между другими лентами. В лентах имеются слои меди, которая является мягким и пластичным металлом. Сжатие стопки четырех лент может привести к деформации мягких слоев, что вызовет деформацию сверхпроводника, и, следовательно, к деградации критического тока и левитационных свойств лент. Для проверки

влияния приложенного давления на критический ток ленты было проведено измерение критического тока лент, находящихся в середине стопки из трех ВТСП-лент (образец № 2) и в стопке из пяти лент (образец № 3). Измерения проводились аналогично измерениям образца № 1. Стопка помещалась между двумя пластинами из нержавеющей

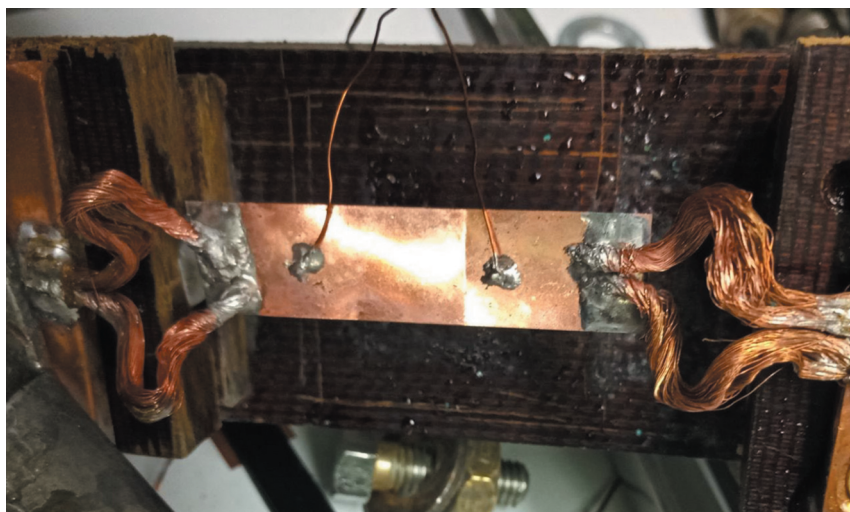


Рис. 4. Внешний вид образца №2, подвергнутого сжатию в направлении, перпендикулярном плоскости ленты. Исследуемая лента помещалась между двумя другими лентами, полученная стопка зажималась между двумя пластинами из нержавеющей стали. На фото видны повреждения ленты на границах области воздействия.

стали, после чего измерялись вольтамперные характеристики критического тока при различных давлениях. График зависимостей нормированного на исходное значение критического тока для стопок лент на рис. 3. Для образца № 2 лента начинает сильно деградировать при незначительных деформациях. Однако это может быть связано с изломом на границах давящей головки, которые видны на фотографии на рис. 4. Когда пресс давит на стопку лент, содержащих такие мягкие металлы, как медь, происходит сжатие стопки и излом на границах давящей головки. При измерении образца № 2 произошел излом в сверхпроводящем слое, что привело к существенной деградации критического тока. Когда в стопке большее число лент, то на границах области давления изгиб не настолько силен, что приводит к меньшей деградации критического тока образца № 3 по сравнению с образцом № 2. Деградация в стопке из пяти лент сравнима с деградацией отдельной ленты. Это обусловлено меньшим изломом ленты на границе области давления, что связано с наличием большего числа лент в стопке. Основная деформация происходит в верхних лентах.

Для проверки этой гипотезы, что основные повреждения возникают на границах области давления, был измерен критический ток образцов для случая, когда потенциальные контакты припаивались внутри области воздействия. Таким образом измерялся критический ток внутри области воздействия, игнорируя границы области воздействия. Было обнаружено, что критический ток внутри области воздействия совпадает с исходным критическим током лент и составляет порядка 450 А. Таким образом деградация сверхпроводника происходит только на границе области воз-

действия, во внутренней части сверхпроводник не претерпевает деградации. Это также подтверждается данными сканирующей холловской магнитометрии образцов. Подробное описание экспериментальной установки и методики эксперимента можно найти в работе [20]. На рис. 5. приведен пример сканирования образца № 1. Видно наличие трех куполов захваченного магнитного потока и его падение в областях, соответствующих границам воздействия. Все эти данные говорят о том, что при сжатии лент деградация сверхпроводящего слоя происходит преимущественно на границе области воздействия.

В левитационных системах такой границы нет, происходит сдавливание всей стопки. Соответственно, сила левитации отдельных лент и лент в небольших стопках не испытывает деградации. Однако в левитационных системах используются стопки из большого числа лент. При сдавливании таких стопок происходит неоднородная по объему стопки деформация в силу наличия мягких слоев меди в слоистой структуре стопки. Это может приводить к падению силы левитации при сжатии стопок. Для проверки этого было проведено исследование влияния вертикального сжатия стопки ВТСП лент на силу левитации. В качестве исследуемого образца использовалась стопка из 50 ВТСП-лент 12×12 мм² производства СуперОкс. Образец подвергался вертикальному сжатию в прессе, после чего лента помещалась в установку для измерения силы левитации. Подробное описание экспериментальной установки и методики эксперимента можно найти в работах [7–8]. Измерения производились при охлаждении в нулевом поле. Лента охлаждалась до температуры жидкого азота, после чего образец подвигался

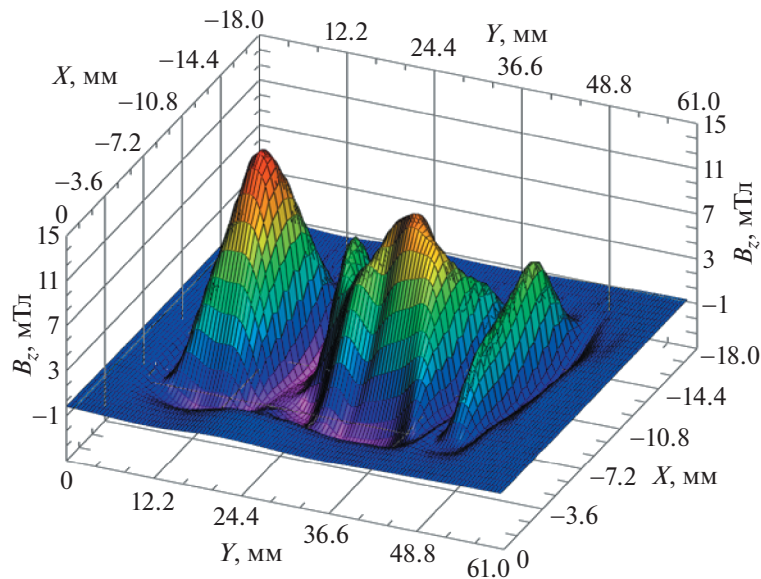


Рис. 5. Результаты измерения захваченного магнитного поля на ВТСП-лентах, полученные методом сканирующей холловской магнитометрии. Представлены результаты для образца № 1.

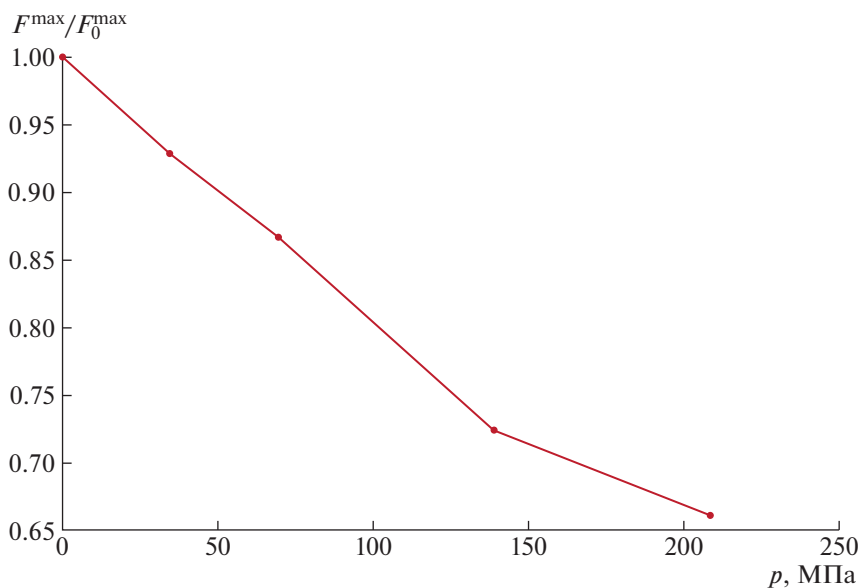


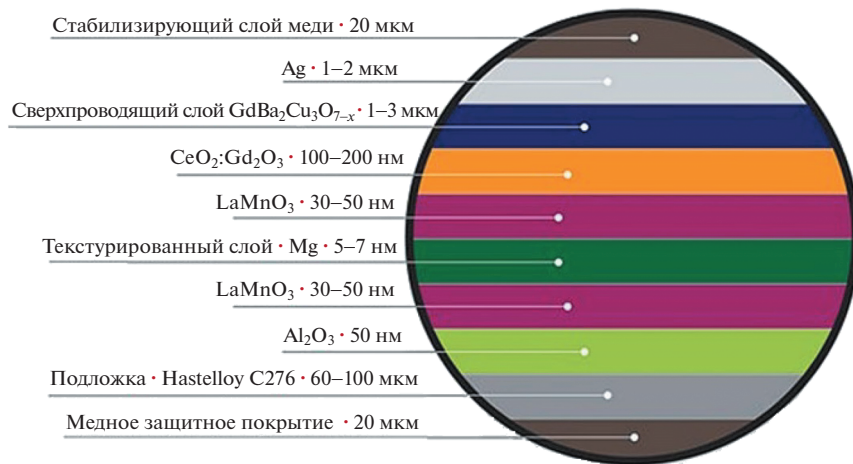
Рис. 6. Зависимость нормированной силы левитации стопки из 50-ти ВТСП-лент от приложенного давления. Нормировка производилась на начальное значение при нулевом давлении. Измерения проводились при температуре кипения жидкого азота — 77.4 К.

опускался до расстояния 7.5 мм до магнитов и измерялась отталкивающая сила. На рис. 6 представлена зависимость максимальной отталкивающей силы от приложенного давления. Сила нормирована на значение при нулевом давлении. Из графика видно, что сдавливание вызывает падение силы левитации. С ростом давления деградация силы левитации увеличивается линейно. Заметно, что деградация начинается при на-

грузке порядка 40 МПа, что эквивалентно нагрузке 0.5 т на стопку 12×12 мм².

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ

Для анализа процессов деградации транспортных и левитационных характеристик, возникающих при механических нагрузках на стопки ком-

Рис. 7. Архитектура ВТСП ленты $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

позитных ВТСП лент была разработана расчетная модель. Применяется метод конечных элементов, реализованный с использованием пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. Для нахождения напряжений и относительных смещений, возникающих в каждом слое ВТСП ленты решается уравнение равновесия в векторной форме (1):

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \mathbf{s} + \mathbf{F}_v, \quad (1)$$

где ρ — плотность, $\mathbf{u}$ — вектор перемещений, $\mathbf{s}$ — механические напряжения, $\mathbf{F}_v$ — внешние объемные силы, приложенные к элементу. В экспериментальной части работы были использованы ВТСП ленты компании СуперОкс, поэтому в модели были рассмотрены ленты с архитектурой, заданной производителем. Архитектура ВТСП-ленты представлена на рис. 7. Композитная сверхпроводящая лента состоит из 10 слоев: подложка Hastelloy C276 (60–100 мкм), буферные слои Al_2O_3 (50 нм), LaMnO_3 (30–50 нм), MgO (5–7 нм), LaMnO_3 (30–50 нм), $\text{CeO}_2:\text{Gd}_2\text{O}_3$ (1–3 мкм), $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (1–3 мкм), Ag (1–2 мкм), с обеих сторон лента закрыта слоем меди Cu (20 мкм). В модели используются реальные толщины слоев и прочностные характеристики слоев ВТСП ленты. В случае сжатия нагрузка прикладывается к верхнему или нижнему слою (Cu), при этом на внешнюю поверхность противоположного слоя накладывается ограничение на смещение по всем направлениям (рис. 8). Величина нагрузки задается силой, нормированной на единицу площади поверхности нагружения. Поскольку в модели мы прикладываем равномерно распределенную нагрузку по поверхности, то можем ограничиться рассмотрением небольшой части образца размером 200×200 мкм. Такой подход позволяет выполнить корректное построение сетки с достаточным качеством для выполнения

расчетов. При этом все особенности поведения ВТСП ленты будут справедливы и для лент и стопок большего размера.

Для расчета напряжений сжатия сила прикладывается вдоль оси Z . Аналогично выполняется моделирование и деформации при сдвиговых нагрузках, с той лишь только разницей, что сила направлена по оси X , и кроме того прикладывается не к поверхности, а во всему объемному домену ВТСП слоя. Одиночная лента рассчитывается в трехмерной модели, тогда как стопки лент для ускорения расчетов были промоделированы в двумерном пространстве.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На основе разработанной модели были проведены расчеты напряженного состояния деформированной ленты, а также стопки ВТСП лент. Были проведены расчеты как деформации сжатия, так и при возникновении сил смещения в плоскости ленты. Во всех случаях нагрузка линейно возрастала от нуля до максимального значения, затем также линейно уменьшалась до нуля. Были рассмотрены два случая деформации сжатия ВТСП ленты: со стороны подложки и со стороны сверхпроводящего слоя. На рис. 9 представлены распределения напряжений в слоях композитной ленты для двух случаев. Эквивалентная нагрузка 8 т на площадь 12×12 мм². Смещение слоев при сжатии иллюстративно и не соответствует истинному.

В случае сжатия со стороны сверхпроводника нагрузки сосредоточены в области тонких буферных слоев Al_2O_3 , LaMnO_3 , MgO , напряжение в них составляет от 740 до 905 МПа. При этом в слое сверхпроводника напряжение не поднимается выше 428 МПа. Для случая сжатия со стороны подложки распределение напряжения более однородно по толщине ВТСП ленты. При той же

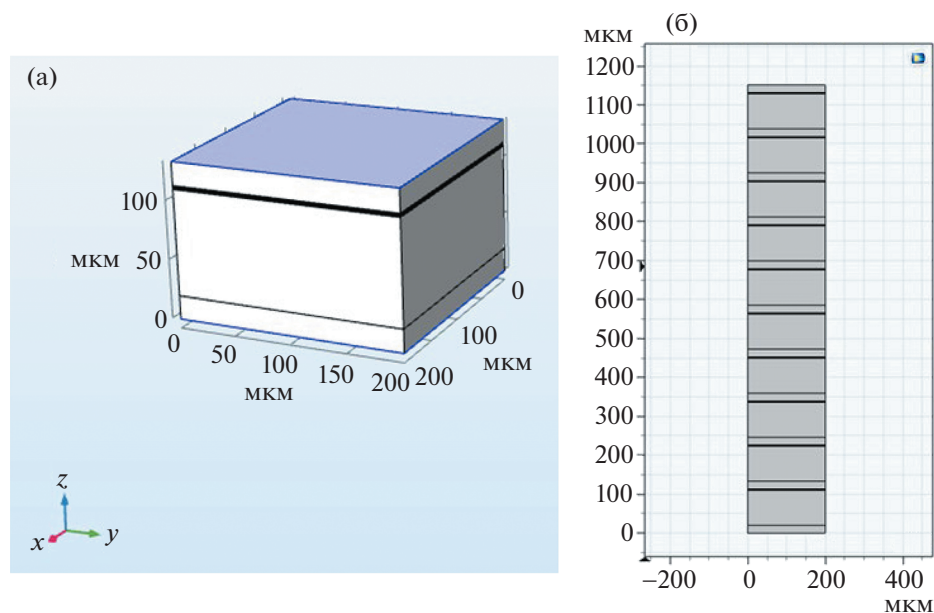


Рис. 8. Расчетная геометрия: (а) одиночная ВТСП лента; (б) стопка ВТСП лент.

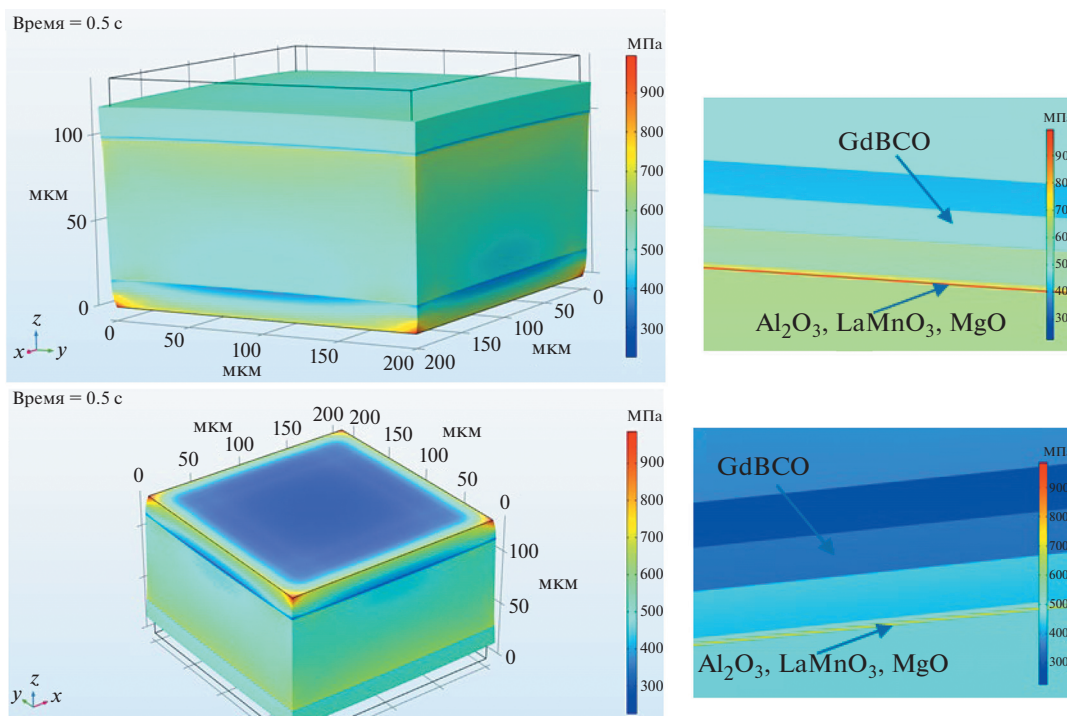


Рис. 9. Распределение напряжений по фон Мизесу: (а) сжатие со стороны сверхпроводника; (б) сжатие со стороны подложки. Приложенное давление 550 МПа, что эквивалентно нагрузке 8 т на площадь $12 \times 12 \text{ мм}^2$.

общей нагрузке на буферных слоях напряжение от 407 до 531 МПа, в слое сверхпроводника – 313 МПа. Такие отличия связаны со структурой композитной ВТСП ленты. Так буферные слои и подложка

обладают высокой плотностью и жесткостью по сравнению с медным и серебряными слоями, а также большим модулем Юнга. В случае сжатия буферные пленки оказываются между плохо де-

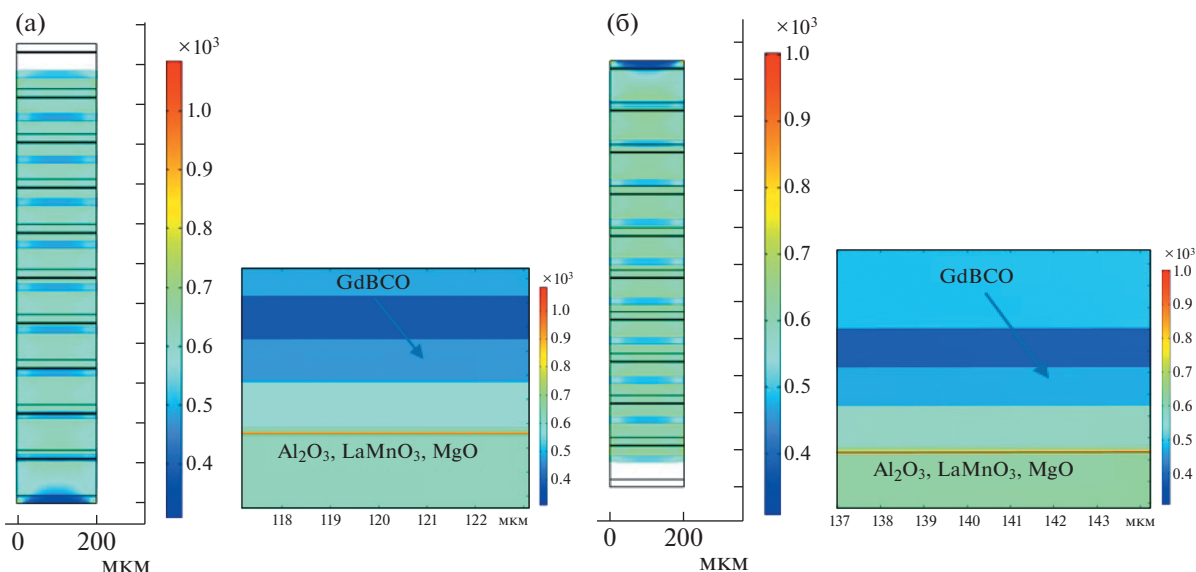


Рис. 10. Распределение напряжений по фон Мизеса [МПа]: (а) сжатие со стороны сверхпроводника; (б) сжатие со стороны подложки. Приложенное давление 550 МПа, что эквивалентно нагрузке 8 т на площадь $12 \times 12 \text{ мм}^2$.

формируемыми слоями. При нагружении со стороны сверхпроводника происходит сжатие верхних слоев меди и серебра, нагрузка передается на ВТСП и буферные слои, дальнейшему распространению напряжений препятствует толстая подложка.

При сжатии со стороны подложки нагрузка перераспределяется между более жесткими и плотными слоями буферов и сверхпроводника за счет деформации верхних неподвижных областей Ag и Cu. При этом для обоих случаев деформация слоя сверхпроводника оказывается очень близкой и находится в интервале 0.4–0.5%. Для буферных слоев возникает существенная разница. Так в случае нагружения со стороны ВТСП слоя деформации достигают значений 0.2–0.27, для случая сжатия со стороны подложки 0.13–0.21%. Аналогичные результаты были получены при моделировании стопки ВТСП лент (рис. 10).

Анализ литературных данных указывает на то, что при таких нагрузках и деформациях никакого значительного изменения (не более 2% от исходного значения в недеформированном состоянии) критического тока [21–24], а значит и силы левитации не происходит. Это хорошо согласуется с проведенными нами экспериментальными исследованиями зависимости критического тока от приложенного давления. Деграция критического тока наблюдалась только на границах области давления, где и происходила деформация изгиба. В этом случае более выгодным оказывается нагружение со стороны ВТСП слоя, поскольку сверхпроводник будет испытывать сжатие, в отличие от случая нагружения со стороны подложки, когда возникает растяжение пленки и возможно образование трещин. Качественно результаты ана-

лиза подтверждаются литературными данными [19], а также проведенным экспериментальным исследованием. Для проверки влияния наличия границы области давления на критический ток, было проведено моделирование стопки лент, на которую давит твердый брусок, ширина которого меньше ширины стопки. На рис. 11. представле-

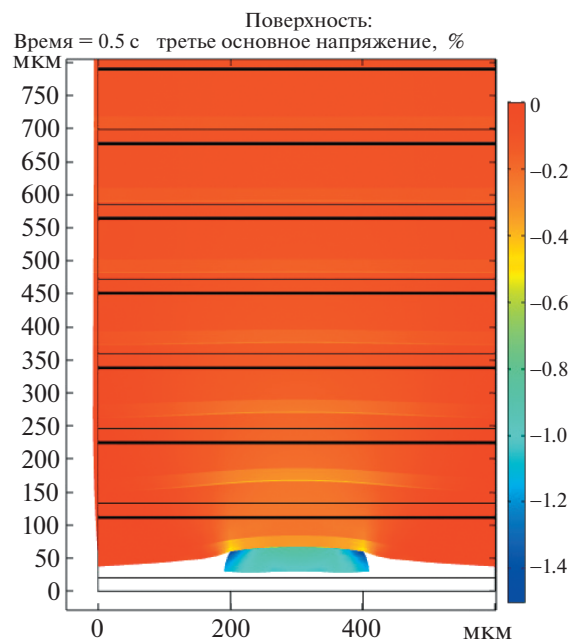


Рис. 11. Распределения напряжений в слоях лент для стопки лент для случая давления бруска. Давление 695 МПа, что эквивалентно нагрузке 10 т на площадь $12 \times 12 \text{ мм}^2$.

ны распределения напряжений в слоях лент для стопки лент для случая давления бруска. Давление 695 МПа, что эквивалентно нагрузке 10 т на площадь $12 \times 12 \text{ мм}^2$. Из полученного распределения видно возникновение больших напряжений, чем в случае однородного сжатия. Согласно литературным данным [21–24], такие деформации должны приводить к деградации критического тока порядка 12%, что согласуется с полученными экспериментальными данными.

Таким образом, расчет показывает, что при нагрузках сжатия эквивалентных 8 т на площадь $12 \times 12 \text{ мм}^2$ не возникает падения критического тока и силы левитации. Однако в реальных лентах имеются флуктуации толщины во всех слоях композитной структуры. При сдавливании реальных стопок лент происходит неоднородная деформация в различных слоях, которая накапливается с увеличением числа лент. Происходят локальные деформации изгиба, которые и приводят к деградации критического тока в реальных левитационных системах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований и численного моделирования влияния механических напряжений сжатия на критический ток и силу левитации ленточных ВТСП композитов показано:

1) При сжатии отдельной ленты и стопок лент небольшой толщины (до 5 лент), деградации характеристик ВТСП-ленты происходит преимущественно на границе области воздействия, что вызвано наличием деформаций изгиба. Результаты численного моделирования показывают, что более выгодным оказывается нагружение со стороны ВТСП слоя, поскольку сверхпроводник будет испытывать сжатие, в отличие от случая нагружения со стороны подложки, когда возникает растяжение пленки и возможно образование трещин.

2) При однородном сжатии ВТСП-ленты не было обнаружено деградации критического тока и силы левитации ВТСП-лент при давлениях до 695 МПа. Экспериментальные данные подтверждаются результатами численного моделирования.

3) При сдавливании больших стопок лент (50 шт.), хотя граница сжатия и отсутствует, происходит неоднородная деформация слоев ленты, что может быть вызвано локальными изгибными деформациями, обусловленными флуктуациями как формы лент, так и толщины слоев в отдельных лентах. Это вызывает линейное с ростом давления падение силы левитации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-19-01527).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Bernstein P., Noudem J. // Supercond. Sci. Technol. 2020. V. 33. P. 033001.
2. Hull J.R. // Supercond. Sci. Technol. 2000. V. 13 (2). P. R1.
3. Werfel F.N. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2012. V. 25 (1). P. 014007.
4. Miyazaki Y. et al. // Cryogenics (Guildf). 2016. V. 80. P. 234–237.
5. Webster J.G. et al. // Wiley Encycl. Electr. Electron. Eng. 2017. P. 1–18.
6. Liu K. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2018. V. 31 (1). P. 015013.
7. Osipov M. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016. V. 26 (4). P. 3601704.
8. Rudnev I. et al. // Mater. Res. Express. 2019. V. 6 (3). P. 036001.
9. Sass F. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2013. V. 23 (3). P. 3600905.
10. Sotelo G.G. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 507 (3). P. 032017.
11. Sass F. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014. V. 24 (3). P. 3600405.
12. Patel A. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016. V. 26 (3). P. 15857463.
13. Irina A. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2019. V. 32 (10). P. 105001.
14. Patel A. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. V. 25 (3). P. 5203405.
15. Rudnev I. et al. // Phys. Proc. 2015. V. 65. P. 141–144.
16. Osipov M. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2019. V. 32 (5). P. 054003.
17. Patel A. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2015. V. 28 (11). P. 115007.
18. Patel A. et al. // Supercond. Sci. Technol. 2017. V. 30 (2). P. 024007.
19. Takao T. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. V. 17 (2). P. 3517–3519.
20. Pokrovskiy S.V., Rudnev I.A., Podlivaev A.I. // J. Phys.: Conf. Ser. 2009. V. 150 (5). P. 052211.
21. Sugano M., Osamura K., Prusseit W., Semerad R., Kuroda T., Itoh K., Kiyoshi T. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2005. V. 15 (2). P. 3581–3584.
22. Osamura K., Machiya Sh., Tsuchiya Y., Suzuki H. // Supercond. Sci. Technol. 2010. V. 23. P. 045020.
23. Chen W., Zhang H., Chen Y., Liu L., Shi J., Yang X., Zhao Y. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2018. V. 28 (3). P. 8400905.
24. Shin H.-S., Bautista Zh. // Supercond. Sci. Technol. 2019. V. 32. P. 064004.

Influence of Pressure on the Critical Current and Levitation Properties of HTS Tapes

M. A. Osipov¹, D. A. Abin¹, S. V. Pokrovskii¹, A. S. Starikovskii¹,
I. V. Anischenko^{1, *}, S. V. Veselova¹, and I. A. Rudnev¹

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

*e-mail: mephizic@gmail.com

Received December 8, 2020; revised January 13, 2021; accepted August 3, 2021

Abstract—The contemporary composite high-temperature superconducting tapes (HTS tapes) are an advanced material for development of systems based on magnetic levitation. Development of levitation systems requires awareness on information on the effect of various external factors on levitation characteristics of the tapes. One of these factors is external mechanical pressure. For comprehension of the processes of deterioration of transport and levitation characteristics originating under mechanical loads on the stacks of composite HTS tapes, the effect of pressure on the critical current and levitation properties of the HTS tapes was investigated. The compression took place in the direction perpendicular to the plane of tape. The pressure varied from 0 Pa to 695 MPa, which corresponded to the force of impact of 10 kN on the stack of fragments of HTS tapes of $12 \times 12 \text{ mm}^2$. The measurements of critical current on applied pressure both for individual tapes and for the stacks of three and five tapes were carried out. Also, the investigation of effect of compression on the levitation force of the stack of 50 tapes was carried out. The theoretical model based on the finite element method implemented with use of the Comsol Multiphysics software package was developed to analyze the obtained experimental results. On the basis of the evidence found, it can be inferred that, at uniform compression of an individual tape and stacks of tapes with small thickness (up to five tapes), deterioration of characteristics of the HTS tape takes place mainly at the boundary of the area of influence, owing to existence of bending deformation. Deterioration of the critical current and levitation force of the HTS tapes under pressures to 695 MPa was not found outside the boundaries of the impact. However, at compression of large stacks of tapes (50 units), though a boundary of compression is absent, inhomogeneous deformation of the layers of the tape proceeds, which can be produced by local flexural deformations determined by fluctuations of both shape of the tapes and thickness of the layers in individual tapes. This is responsible for a linear decrease in the levitation force with increase in pressure.

Keywords: HTS, finite element method, critical current, levitation, stacks of HTS tapes