

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ЗНАЧЕНИЯ ТОКА В НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВТСП-ЛЕНТАХ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

В настоящее время возрастает интерес к практическому применению высокотемпературных сверхпроводящих материалов (ВТСП) в электроэнергетике, в технологиях создания магнитов сильным полем [1], в том числе в магнитных системах установок термоядерного синтеза [2]. Процесс изготовления высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) второго поколения состоит из нескольких стадий, включающих осаждение буферных слоев с толщинами от десятков до нескольких сотен нанометров, а также ВТСП слоя, включающего искусственные центры пиннинга с размерами порядка единиц нанометров. Функциональные и эксплуатационные свойства сверхпроводников сильно зависят от микроструктуры ВТСП слоя. Для целей снижения индуктивности в обмоточных проводах (токонесущих элементах) для крупных электромагнитов используют пакеты ВТСП лент. При изготовлении токонесущих элементов и при изготовлении обмоток в пакетах ВТСП лент могут возникать сжимающие нагрузки, которые приводят к ухудшению токовых характеристик из-за разрушения тонких буферных и/или ВТСП слоев [3]. Целью данной работы явилась оценка изменений значений критического тока в наноструктурированных ВТСП лентах второго поколения с различной архитектурой слоев приложении к ним сжимающих механических нагрузок.

Для исследования использовали два типа ВТСП лент: 1) полученные на экспериментальной линии в НИЦ Курчатовский институт [4], 2) изготовленные компанией «С-Иновации». Исследованные ВТСП ленты имели различную архитектуру слоев: использовали ВТСП ленты с медным покрытием, а также аналогичные ленты с дополнительным лужением припоеем ПОС-61. Сжимающие механические нагрузки создавались на испытательной машине Instron-8802 при комнатной температуре. Диапазон нагрузок на сжатие составлял от 50 до 400 МПа. Значения критического тока определяли из данных Холловской магнитометрии.

Значения приведенного среднего критического тока ( $I_c/I_{c0}$ ) для лент во всех пакетах в зависимости от величины давления представлены на рис. 1. В луженых лентах приложении

механической нагрузки наблюдается более сильное убывание значений тока с величиной давления, чем для нелуженых. Для луженых лент наблюдаются в среднем более низкие значения критического тока, чем для нелуженых, а с увеличением давления приложенной механической нагрузки наблюдается более быстрое падение значений тока.

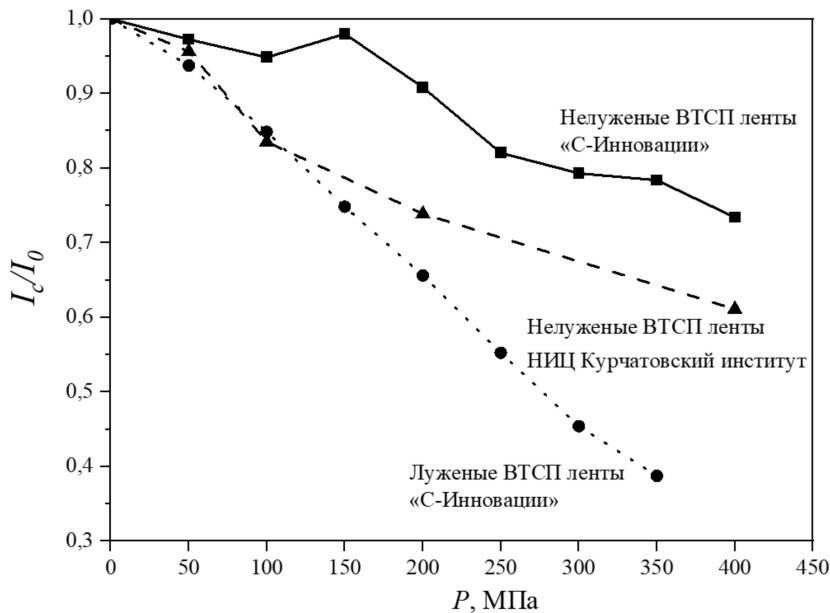


Рис 1. Значения приведенного тока для образцов ВТСП-лент при приложении к ним сжимающих механических нагрузок.

В рамках данной работы было проведено сравнительное исследование изменений токонесущей способности ВТСП-лент с различной архитектурой: покрытых гальванической медью, а также дополнительно луженых припоем. Процесс лужения оказывает решающее значение на стабильность таких лент к механическим нагрузкам. Было показано, что как критический ток, так и его однородность по длине ленты ухудшаются существенно быстрее с увеличением нагрузки для луженых ВТСП-лент, по сравнению с нелуженными.

При приложении механических нагрузок происходит образование дефектов вnanostructured слоях ВТСП, что сказывается на токонесущих характеристиках. При оценке изменений распределения критического тока от величины нагрузки было показано, что для длинномерных ВТСП-лент ожидается более высокая вероятность встретить место с низким значением критического тока в случае луженых лент, чем для нелуженых. После приложения сжимающих механических нагрузок происходит существенное

локальное перераспределения плотности тока, что нужно учитывать в расчётно-аналитических работах.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Maeda, H., Yanagisawa, Y. Recent developments in high-temperature superconducting magnet technology // IEEE Transactions on applied superconductivity. – 2013. – 24, 3. – P. 1-12.
2. Krasilnikov, A.V. ITER and TRT-Technological Platforms for Controlled Thermonuclear Fusion // Plasma Physics Reports. – 2024. – 50, 4. – P. 397–405.
3. Преображенский, И.И., Гурьев, В.В., Диев, Д.Н., Наумов, А.В., Поляков, А.В., Мосеев, К.В., Макаренко, М.Н., Шавкин, С.В. Влияние сжимающих механических нагрузок на распределение критического тока в пакетах ВТСП-лент // Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования. – 2024. – 2, 2. – С. 31–41.
4. Воробьева, А.Е., Абдуханов, И.М., Раков, Д.Н., Белотелова, Ю.Н., Котова Е.В., Коновалов, П.В. и др. Мишени для получения ВТСП 2 поколения методом импульсного лазерного напыления // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2012. – 2. – С. 108–113.