
МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИЯ
ДЛЯ НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

УДК 538.945

**ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК
НА СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ВТСП ЛЕНТ И СБОРОК**

© 2024 г. К. А. Бородако^а, *, М. А. Осипов^а, С. В. Покровский^а, Д. А. Абин^а,
С. В. Веселова^а, А. С. Стариковский^а, И. А. Руднев^а

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

*E-mail: borodako_kir@mail.ru

Поступила в редакцию 23.06.2023 г.

После доработки 26.06.2023 г.

Принята к публикации 27.07.2023 г.

Проведено исследование деформационной стойкости высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент при различных параметрах деформации. С помощью четырехконтактного метода измерялся критический ток в образцах, деформированных на инденторах диаметрами 5–20 мм растягивающими усилиями до 200 Н. Исследованы повреждения сверхпроводящего слоя и локальные сверхпроводящие свойства подвергнутых механическим воздействиям образцов при помощи сканирующей электронной микроскопии и сканирующей Холловской магнитометрии.

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, ВТСП лента, механическая деформация, критический ток, намагниченность

DOI: 10.56304/S2079562923010074

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных областей использования высокотемпературных сверхпроводящих материалов в виде композитных лент (ВТСП-ленты второго поколения) является создание индукционных накопителей энергии, обмоток двигателей, генераторов, соленоидов, магнитолевитационных подшипников и кинетических накопителей энергии [1–7]. Как правило в такого рода системах ВТСП ленты используются в качестве обмотки. Различные механические воздействия, в том числе те, которые имеют место непосредственно при производстве этих систем (намотка обмоток), могут повлиять на сверхпроводящие свойства материала. Ранее было исследовано влияние давления на критический ток и левитационные свойства ВТСП-лент [8], а также влияние изгибных механических деформаций ВТСП-лент на токопроводящие характеристики [9]. Однако на практике при намотке катушек имеет место комбинация деформаций сжатия-растяжение и изгиба. В литературе недостаточно информации, чтобы полностью охарактеризовать влияние механических нагрузок на сверхпроводящие свойства. В частности, отсутствует информации о поведении стопок (сборок) ВТСП-лент, когда виток ложится на виток, особенно в комбинации изгиба и растяжения с плавно нарастающим усилием. Поэтому для исследования деградации токонесущей способности в катушке (магните) из-за деформации необ-

ходимо провести исследования сверхпроводящих ВТСП-лент и сборок как от величины изгиба (диаметра сердечника катушки) и, так и от прикладываемого усилия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При выполнении проекта была исследована композитная сверхпроводящая лента производства компании СуперОкс (Россия) [10]. Общая толщина ленты составляет порядка 0.1 мм. Она складывается из медного защитного покрытия 20 мкм с каждой стороны, подложки Hastelloy C276 толщиной 60 мкм, буферных слоев Al_2O_3 , Y_2O_3 , MgO , LaMnO_3 и $\text{CeO}_2\text{:Gd}_2\text{O}_3$ общей толщиной примерно 0.3 и 1.3 мкм сверхпроводящего слоя REBaCuO (где RE – редкоземельный элемент). Ширина ленты составляет 4 мм.

Для измерения критического тока при механических нагрузках была разработана и собрана установка. Схематическое изображение и внешний вид установки представлены на рис. 1.

Рама установки выполнена из алюминиевого профиля, в котором продольная балка (1) жестко закреплена по концам на двух поперечных (2). По центру этой балки установлена ось (3). На нижнем конце оси исследуемая лента (4) закрепляется, с одной стороны, с помощью двух ступенчатых пластин (5), соединенных болтом, и перекидывается через

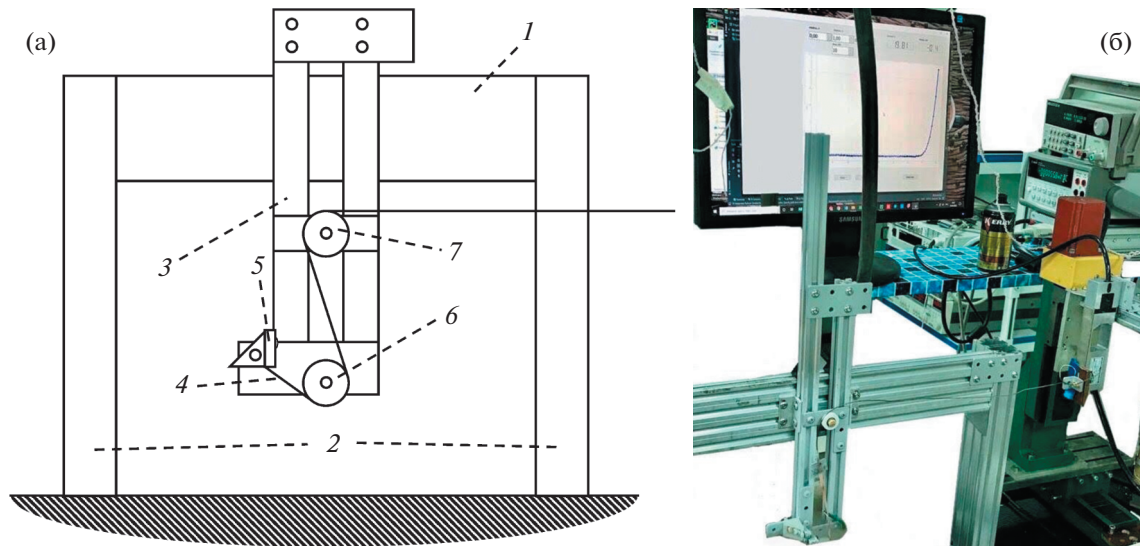


Рис. 1. (а) Схематическое изображение системы измерения критического тока при изгибных нагрузках (имитация намотки), в том числе с преднатягом: 1 – продольная балка, 2 – поперечные балки, 3 – ось, 4 – образец, 5 – ступенчатые пластины для фиксации ленты, 6 – индентор; (б) Внешний вид экспериментальной установки.

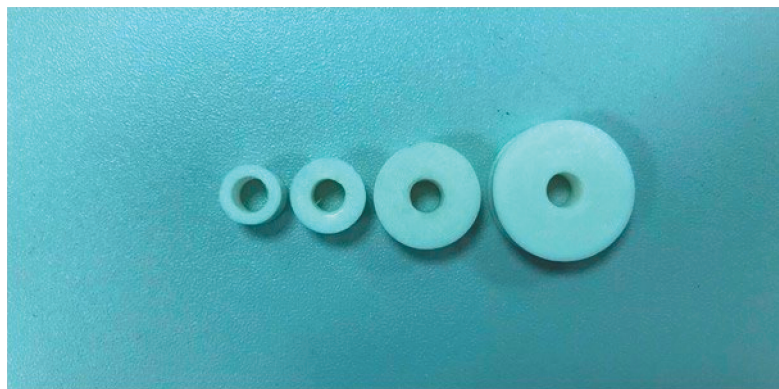


Рис. 2. Внешний вид инденторов диаметрами (слева направо) 8, 10, 15 и 20 мм.

индентор (6) заданного диаметра для достижения необходимой деформации. Индентор, свободно вращающийся вокруг своей оси, имеет форму цилиндра с желобом для укладки ленты. Другой конец ленты через неподвижный блок (7) прикрепляется к тензорезистивному датчику Т24А компании ТЕНЗО-М, измеряющему усилия до 30 кг с классом точности С3. Тензорезистивный датчик устанавливается на систему позиционирования, способную к трехкоординатным (вертикальным и боковым) перемещениям с минимальным шагом 2 мкм. Передвижение системы позиционирования позволяет изменять натяжение исследуемого образца. Критический ток измеряется на участке, который непосредственно соприкасается с индентором. Для проведения прямых токовых измерений индентор с деформированным участком образца помещается в криостат с жидким азотом.

ВТСП лента закреплялась таким образом, что при изгибе на инденторе сверхпроводящий слой испытывал деформацию растяжения.

В качестве индентора использовались цилиндры разного диаметра (5, 8, 12, 15 и 20 мм). Внешний вид инденторов представлен на рис. 2. Сбор данных с тензорезистивного датчика и управление системой позиционирования осуществлялись при помощи специального интерфейса, разработанного в программной среде LabVIEW.

В качестве образцов использовались как отдельные ленты, так и сборки. Сборка лент представляет собой две ленты, одна из которых укладывалась между индентором и измеряемой лентой.

Вольтамперные характеристики (ВАХ) измерялись с помощью четырехконтактного метода. Измеряется напряжение области образца, деформированной индентором, по которой течет ток.

Таблица 1. Таблица образцов

Номер	Диаметр изгиба, мм	Толщина подложки, мкм	Деформация изгиба, %	Крит. ток до деформации, А	Расстояние между контактами, мм
1	15	60	0.4	71	20
2	8	60	0.75	64	20
3	8	60	0.75	64	20
4	20	60	0.3	75	22
5	20	60	0.3	78	33
6	20	60	0.3	84	32
7	15	60	0.4	81	32
8	15	60	0.4	82	31
9	15	30	0.2	160	30
10	20	40	0.2	160	30
11 сборка	20	60	0.15	71	30
12 сборка	15	60	0.2	70	30

По ВАХ определялся критический ток по критерию 1 мкВ/см.

Для измерения намагниченности использовалась сканирующая Холловская магнитометрия [11]. В работе использовался датчик Холла с размером активной зоны 0.1×0.05 мм. Сканирование проводилось при расстоянии до поверхности образца 0.6 мм.

Исследования микро- и макроструктуры поверхности сверхпроводящего слоя после удаления слоев меди и серебра проводили с помощью оптического микроскопа Olympus BX51, а также сканирующего электронного микроскопа LYRA3 TESCAN (СЭМ).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе эксперимента были получены зависимости критического тока от механических напряжений: приложенного усилия (деформация растяжения) для различных диаметров индентора (деформация изгиба), как для одной ленты, так и в составе сборки лент.

Сначала измерялся критический ток каждого образца без деформации. В табл. 1 приведены значения измерений критического тока для образцов, не подвергнутых механическому воздействию.

На рис. 3 приведены типичные ВАХ лент, деформированных на инденторах диаметрами 15 и 20 мм. Для индентора диаметром 15 мм в ленте с толщиной подложки 60 мкм, сверхпроводящий слой деформируется на 0.4%. На рис. 4 приведены ВАХ внешней ленты в сборке, деформирован-

ной на инденторах 15 и 20 мм. На рис. 5 представлены зависимости нормированного критического тока от нагрузки для всех образцов. Нормировка для каждого образца проводилась на значение критического тока, не подвергнутого механическому воздействию образца.

Для лент с толщиной подложки 60 мкм, подвергнутых деформации индентором с диаметром 15 мм, не удалось достигнуть полного разрушения сверхпроводимости. Критический ток после растяжения с усилием 200 Н составил 30–35 А. Для образца с толщиной подложки 30 мкм сверхпроводящие свойства пропали после воздействия с усилием 92 Н.

Для образцов, деформированных на инденторе диаметром 20 мм, критический ток падал на 10 А после приложения нагрузки 10 Н. Нагрузки до 10 Н не приводили к значительному изменению критического тока. При приложении нагрузки 20–25 Н критический ток в образцах стремился к 0 А, и при превышении нагрузки больше 25 Н критический ток обращался в 0 А.

Образцы № 11 и 12 являются отдельными верхними лентами в сборке из двух лент. В образце № 12 наблюдается резкая деградация значений критического тока при превышении нагрузки 50 Н в области воздействия, что говорит о локальных механических повреждениях. При превышении нагрузки 150 Н сверхпроводимость разрушается полностью. В образце № 11 значение критического тока остается в пределах 2% от начальной величины до нагрузки 50 Н. Это может быть вызвано сглаживанием влияния индентора, вызванным на-

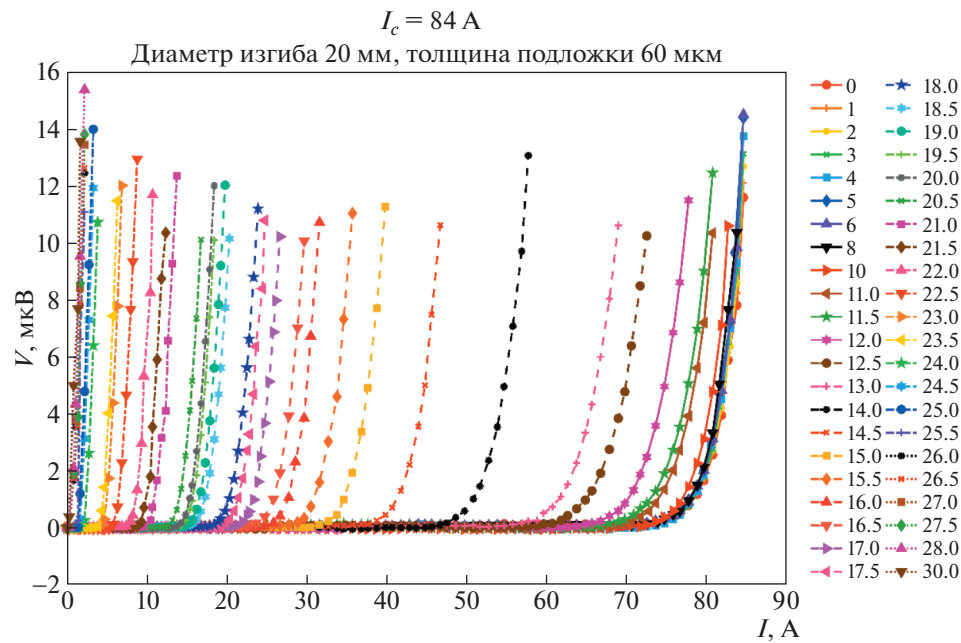


Рис. 3. ВАХ образца № 6 деформированного индентором диаметром 20 мм. В легенде указаны значения натяжения в Ньютонах.

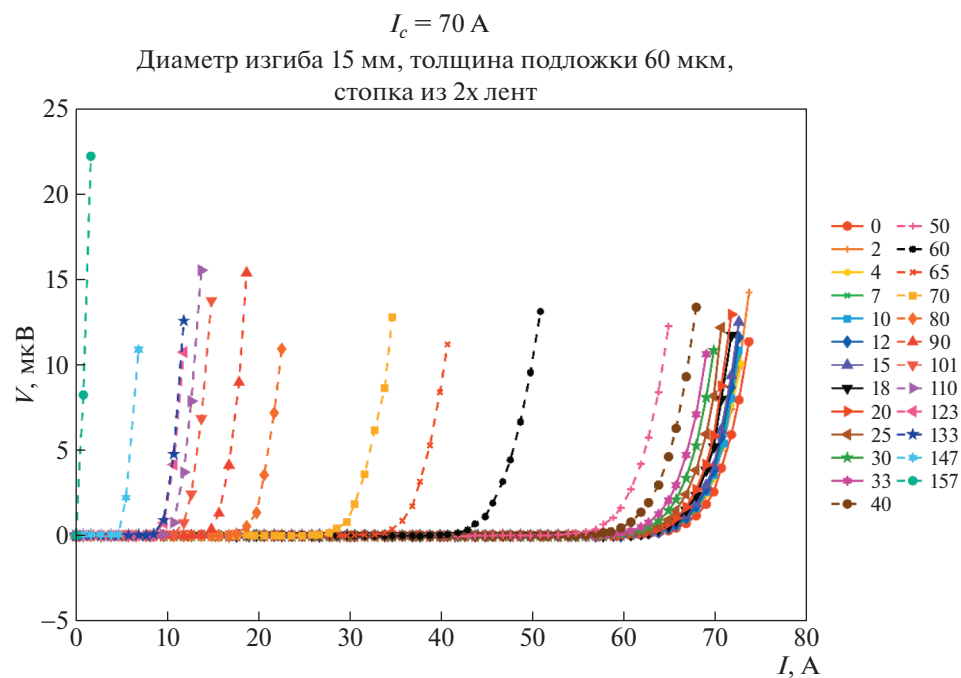


Рис. 4. ВАХ внешней ленты в сборке, деформированной индентором диаметром 15 мм, образец № 12. В легенде указаны значения натяжения в Ньютонах.

личием мягких слоев меди и серебра в нижней ленте. Во всех образцах, деформированных на инденторе диаметром 8 мм без растяжения, критический ток упал до 0 А.

После полного цикла измерения ВАХ образцы исследовались с помощью Холловской магнито-

метрии. Типичное изображение проникновения магнитного поля для образца № 2 после механического воздействия приведено на рис. 6. Деформация на инденторе диаметром 8 мм приводит к возникновению провала в картине захваченного магнитного потока образца. Характерная картина

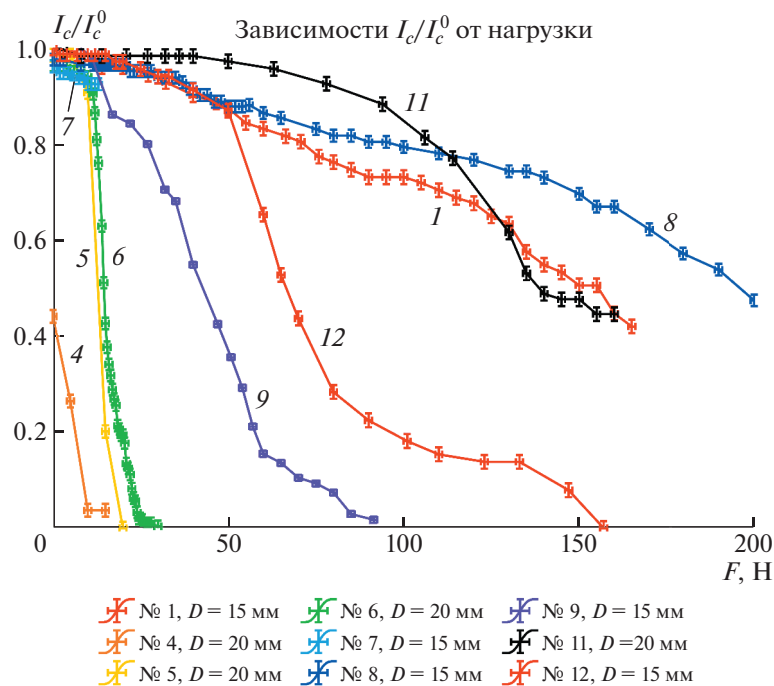


Рис. 5. Зависимость нормированного критического тока от нагрузки для различных образцов. В легенде указаны номера образцов и соответствующий диаметр изгиба индентора. Стрелочками на графике указаны номера образцов.

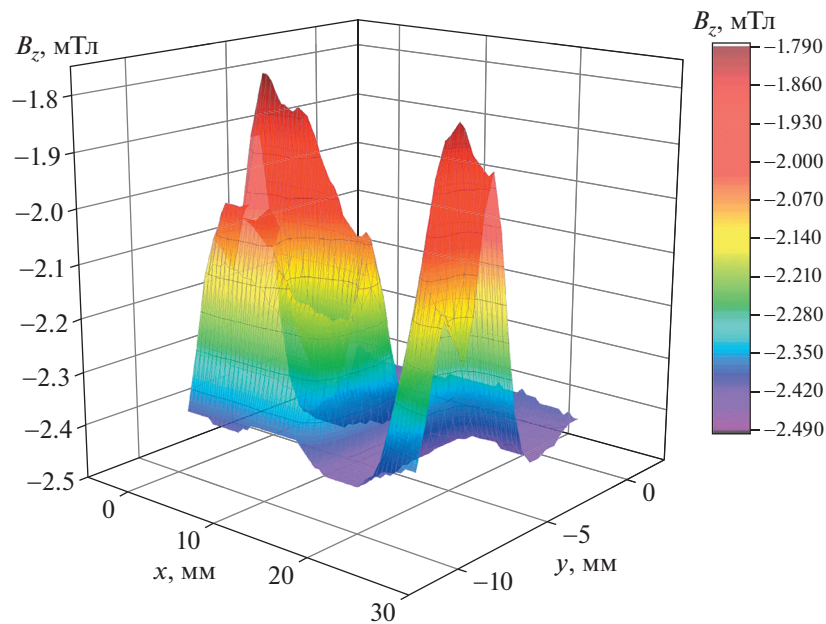


Рис. 6. Распределение захваченного магнитного поля над поверхностью ВТСП ленты после изгибной механической деформации величиной 0.75%. Температура измерения 77.4 К.

наблюдается вне зависимости от силы натяжения. Наличие провала говорит о возникновении локального дефекта сверхпроводящего слоя в области провала, приводящего к значительной деградации величины критического тока.

Для проведения исследований на электронном и оптическом микроскопах с образцов, предварительно подвергнутых механической деформации, при помощи химического травления были удалены защитные слои серебра и меди.

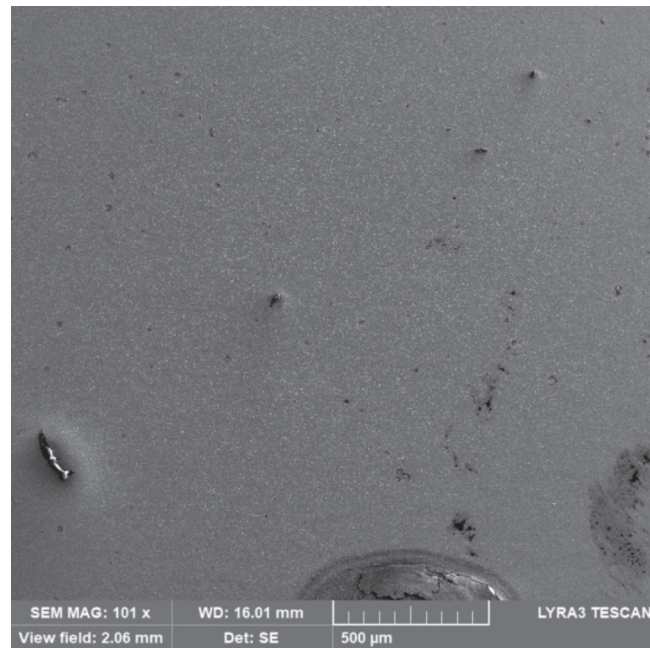


Рис. 7. СЭМ-изображение сверхпроводящего слоя ВТСП ленты после деформации с усилием 200 Н (диаметр изгиба 15 мм).

На рис. 7 представлено СЭМ-изображение сверхпроводящего слоя после деформации с усилием 200 Н с диаметром изгиба 15 мм. Поверхность пленки однородная, наблюдается несколько отдельных дефектов структуры, а также локальные области загрязнений. В нижней части изображения есть область с оставшимися защитными слоями. На поверхности не наблюдается видимых дефектов сверхпроводящего слоя в результате деформаций.

На рис. 8 представлена ВТСП-лента после деформации с усилием 200 Н на инденторе диамет-

ром 8 мм. На полученных изображениях можно отметить возникшие дефекты в результате изгибных деформаций. На рис. 8а отчетливо проявляются вертикальные борозды (отмечены стрелками). Борозды протяженные и проходят параллельно друг другу поперек ВТСП ленты. Поскольку изгиб выполнялся поперек образца, то наиболее вероятно появление дефектов именно в этом направлении. Также на поверхности в нижнем левом углу (отмечено овалом) сохранился участок с остатками защитных слоев, не удаленных в процессе травле-

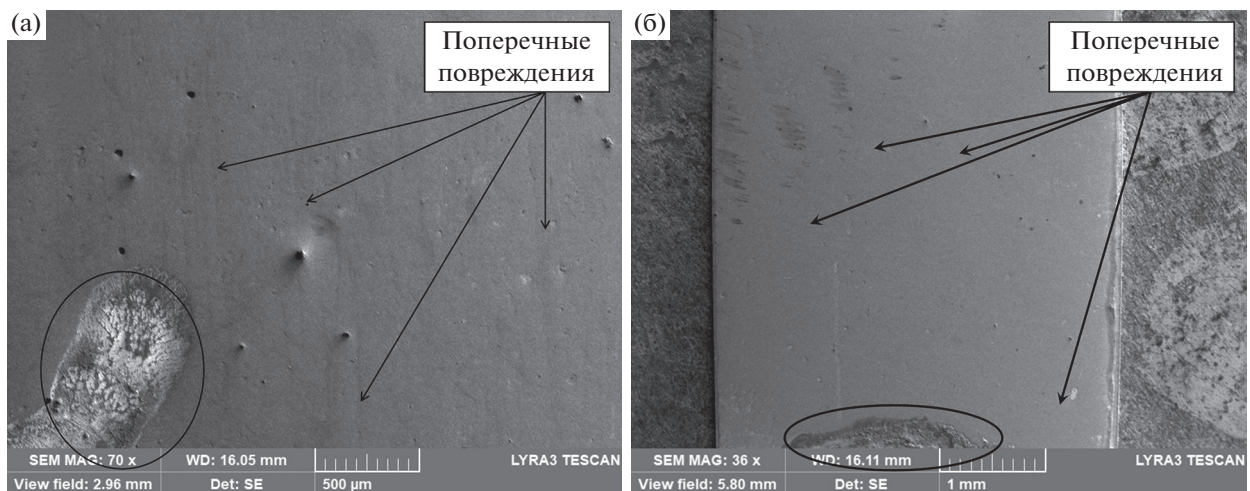


Рис. 8. СЭМ-изображение сверхпроводящего слоя ВТСП ленты образца после деформации с усилием 200 Н (диаметр изгиба 8 мм) (а) образец № 2 и (б) образец № 3.

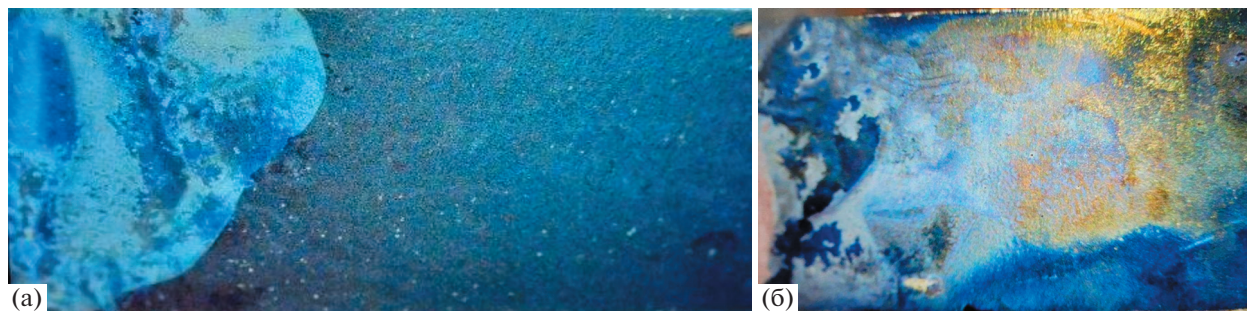


Рис. 9. (а) Оптическое изображение сверхпроводящего слоя ВТСП ленты, деформированной с усилием 200 Н, при диаметре изгиба 5 мм; (б) Увеличенное изображение области деляминации.

ния. Отметим, что дефекты изгиба не проявились в этой области.

На рис. 8б показано, что при одной и той же деформации и нагрузке дефекты не проявились столь же явно по сравнению с рис. 8а. Можно отметить незначительные поперечные локальные дефекты (отмечены стрелками). Таким образом, мы также можем отметить, что при изгибах ВТСП ленты вблизи критического радиуса возникновения поперечных дефектов носит вероятностный характер и, скорее всего, зависит от наличия дефектов материалов в исходной, недеформированной ленте.

При экстремальных нагрузках (усилие 200 Н, диаметр изгиба менее 5 мм) может наблюдаться деляминация ВТСП ленты и отрыв сверхпроводящего слоя от буферных слоев. На рис. 9 представлено оптическое микроскопическое изображение ВТСП ленты, деформированной с усилием 200 Н при изгибе на 5 мм. В левой его части произошла деляминация и скол сверхпроводящего слоя (он имеет черный цвет на изображении, правая часть). Увеличенное изображение этой области представлено на рис. 9б. На поверхности ленты можно заметить остатки сверхпроводящего слоя (синий цвет), а также буферных слоев (цветные области).

ВЫВОДЫ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

С помощью измерений критического тока было установлено, что в образцах, деформированных на инденторе диаметром 20 мм, нагрузки до 10 Н не приводили к значительному изменению критического тока. При приложении нагрузки 20–25 Н критический ток в образцах стремился к 0 А, и при превышении нагрузки 25 Н критический ток обратился в 0 А.

Было установлено, что деформация индентором диаметром 15 мм лент с толщиной подложки

60 мкм с усилием 200 Н вызывает падение критического тока на 45%. В то время как для образца с толщиной подложки 30 мкм сверхпроводящие свойства пропали после воздействия с усилием 92 Н. В образцах, деформированных на инденторе диаметром 8 мм, критический ток стал равен 0 А без растяжения.

С помощью Холловской магнитометрии показан провал в картине захваченного магнитного потока образца. Характерная картина наблюдается вне зависимости от силы натяжения для индентора диаметром 8 мм. Наличие провала говорит о возникновении локального дефекта сверхпроводящего слоя в области провала, приводящего к значительной деградации величины критического тока.

Показано возникновение поперечных дефектов ВТСП лентах, ограничивающих величину критического тока образцов при радиусах изгиба близких к критическим. При этом возникновение дефектов предположительно связано с исходными характеристиками образца в недеформированном состоянии и наличием дефектов ВТСП лент, полученных при производстве.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Supreeth D.K. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2022. V. 32 (3). P. 1–15.
2. *Zhang H., Mueller M.* // Supercond. Sci. Technol. 2021. V. 34 (4). P. 045018.
3. *Sass F. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2014. V. 24 (3). P. 3600405.
4. *Patel A. et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2015. V. 8223. P. 5203405.

5. Zimmermann A.W. *et al.* // Energy Rep. 2020. V. 6. P. 180–188.
6. Ciceron J. *et al.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2018. V. 28 (4). P. 5701005.
7. Uglietti D. // Supercond. Sci. Technol. IOP Publishing. 2019. V. 32 (5). P. 053001.
8. Osipov M.A. *et al.* // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84. P. 1843–1851.
9. Veselova S.V. *et al.* // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85. P. 1853–1858.
10. SuperOx. <https://www.superox.ru>.
11. Oral A. *et al.* // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 1324–1326.

Influence of Mechanical Loads on Superconducting Properties of HTSC Tapes and Assemblies

K. A. Borodako¹, *, M. A. Osipov¹, C. B. Pokrovskiy¹, D. A. Abina¹,
S. V. Veselova¹, A. S. Starikovskiy¹, and I. A. Rudnev¹

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

*e-mail: borodako_kir@mail.ru

Received June 23, 2023; revised June 26, 2023; accepted July 27, 2023

Abstract—This article studies the deformation resistance of high-temperature superconducting (HTSC) tapes for various parameters of deformation. The four-contact method has been used to measure the critical current in specimens deformed on indenters with diameters of 5–20 mm by tensile forces up to 200 N. The damage to the superconducting layer and local superconducting properties of mechanically impacted specimens have been investigated using scanning electron microscopy and scanning Hall magnetometry.

Keywords: high-temperature superconductor, HTSC tape, mechanical deformation, critical current, magnetization