УДК 538.945

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСОВ УДАРНЫХ ВОЛН НА СТРУКТУРУ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ПАРАМЕТРЫ ЛЕНТ МgB₂

© 2019 г. Б. П. Михайлов^{1,} *, В. Я. Никулин², А. Б. Михайлова¹, П. В. Силин², И. В. Боровицкая¹, С. В. Шавкин³, А. А. Серов⁴

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 119991 Москва, Россия ²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия ³Научно исследовательский центр "Курчатовский институт", 123182 Москва, Россия ⁴Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, 119017 Москва, Россия *E-mail: borismix@vandex.ru

> Поступила в редакцию 12.03.2018 г. После доработки 17.03.2018 г. Принята к публикации 20.03.2018 г.

Показана возможность повышения критического тока лент MgB_2 , содержащих добавки углерода и кислорода, при воздействии ударных волн, создаваемых импульсной плазмой на установке "Плазменный фокус". Исследована микроструктура лент и химический состав сверхпроводящих прослоек в исходном состоянии и после ударного воздействия на различных расстояниях между образцами и плазменным анодом (от 25 до 45 мм) и при изменении количества ударов (от трех до пяти). Изучены закономерности изменения критического тока в зависимости от величины поперечных и продольных магнитных полей в диапазоне 2–9 Тл при 4.2 К. Установлено, что в результате ударного и теплового воздействия ударных волн происходит уплотнение сверхпроводящих прослоек, дробление зерен, гомогенизация, изменение химического состава. Это способствует повышению критического тока на 50–80 А в поперечном магнитном поле с индукцией 2–3 Тл.

Ключевые слова: ударная волна, плазменный фокус, критический ток, вольт-амперные характеристики, внешнее магнитное поле, макро- и микроструктура лент, плотность сверхпроводящих прослоек. **DOI:** 10.1134/S020735281901013X

введение

В работах [1-10] было использовано ударноволновое воздействие (УВВ) для увеличения плотности критического тока в композитных ВТСПлентах YBCO(123) и Bi(2223). В основу данных исследований положен эффект образования точечных дефектов — вакансий и межузельных атомов (коллективных пар Френкеля) на фронте ударных волн при их прохождении через металлические мишени [11, 13]. Концентрация образующихся вакансий многократно превышает концентрацию термических вакансий, присутствующих в сверхпроводнике при выбранной температуре эксперимента [14]. Кроме появления вакансий при нанесении ударов ускоряются диффузионные процессы за счет возникающих при прохождении ударных волн избыточных термодинамически неравновесных дефектов, а также, возможно, за счет образующихся дислокационных петель внедрения. Все эти исследования [14, 15] дают основание предполагать, что при воздействии на ВТСП ударных волн большой мощности можно ожидать существенных изменений сверхпроводящих характеристик как за счет создания равновесных структурно-фазовых состояний, так и за счет образования дислокационных петель внедрения и вакансионных пор, которые являются эффективными центрами пиннинга [15]. Интерес к данным исследованиям постоянно растет, поскольку этот способ дает реальный шанс улучшить сверхпроводящие характеристики ВТСП.

Целью настоящей работы было изучение влияния энергии нанесения ударов (анодом установки $\Pi \Phi$) на критический ток в поперечном и параллельном магнитном поле 2–9 Тл, на микроструктуру, гомогенность и химический состав сверхпроводящих прослоек.

МАТЕРИАЛЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Для исследования были выбраны образцы 14-жильных лент MgB_2 , произведенных с использованием метода порошковой технологии фирмой Columbus Superconductor (Италия). Сверхпроводящие прослойки легированы угле-



Рис. 1. Схема установки кумулятивного плазменного воздействия.

родом и кислородом. Эксперименты проводились на лентах толщиной 0.65 мм, шириной 3.75 мм и длиной 35–40 мм. Сверхпроводящие прослойки MgB₂ заключены в композиционную оболочку из железа и никеля. В сердцевину ленты для стабилизации сверхпроводящего состояния введена медь.

Ударные волны, воздействовавшие на изучаемые образцы лент MgB₂, генерировали на установке "Плазменный фокус" (установка Тюльпан ПФ-4) в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН. Схема установки и фотография плазменной струи в разрядном пространстве представлены на рис. 1 и 2. Ударные волны генерировались при ударе плазменной струи о материал мишени. Источником ударных волн являлась мишень (тонкая фольга из молибдена), установленная на пути плазменной струи. Максимальная запасенная энергия в конденсаторном накопителе достигает 4 кДж, а в плазменной струе, ударяемой по мишени – порядка 100 Дж. Время ее воздействия на мишень составляло 10⁻⁷ с. Плотность потока энергии на мишени достигала ~10⁹ Вт/см², скорость плазменной струи ~107 см/с.

Рабочую камеру заполняли аргоном при давлении 1.5 Торр. Молибденовая мишень, устанавливаемая перед исследуемым ВТСП образцом, являлась как источником ударных волн, так и защитой от прямого воздействия на образцы плазмы. От прямого термического воздействия плазменного импульса поверхность исследуемых образцов лент защищали фольгой из молибдена



Рис. 2. Фотография плазменной струи в разрядном пространстве.

толщиной 0.2 мм, которая одновременно являлась как мишенью для плазменной струи, так и источником ударных волн. Для выравнивания ударной энергии на поверхности образца генерируемые в мишени ударные волны пропускали через тонкий (~1 мм) слой эпоксидной смолы, заполняющий зазор между мишенью и сверхпроводящей лентой. Чтобы предотвратить смещение, образцы фиксировали в кювете из стали, в которой имелось отверстие диаметром 10 мм, через которое струя плазмы попадала на мишень. Такая конструкция позволила равномерно передавать давление в объем образца и защитить поверхность исследуемых образцов от температурного перегрева и разрушения.

Применительно к лентам MgB_2 длина зоны воздействия ударных волн была равна 10 мм. Энергия ударов менялась за счет изменения расстояния меду анодом ПФ и ВТСП образцом. Расстояние от анода установки ПФ до поверхности лент составляло 25, 30, 35 и 40 мм. Количество ударов изменяли от трех до пяти. Все удары наносили перпендикулярно поверхности ленты только с одной стороны. Временной интервал между ударными импульсами составлял 1.5 мин.

Критические токи и вольт-амперные характеристики (ВАХ) лент в исходном состоянии и после ударных воздействий были измерены в Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур в г. Вроцлаве (Польша) на биттеровском магните в поперечных и параллельных магнитных полях 2–9 Тл при температуре 4.2 К, а также в НИЦ "Курчатовский Институт". Температура сверхпроводящего перехода T_c была определена на установке измерения магнитных полях.



Рис. 3. РЭМ-изображения поперечного сечения исходной ленты MgB₂: а – полное сечение; б – фрагмент структуры при увеличении ×283; в – при увеличении ×3000.

Микроструктура поперечного и продольного сечений исходных лент и после нанесения ударов была изучена при различных увеличениях в растровом электронном микроскопе (РЭМ) EVA-40 фирмы ZEISS. Элементный состав сверхпроводящих прослоек в объеме керамики и на границах раздела с металлической оболочкой (железом) исследован в растровом электронном микроскопе JSM-35 с приставкой Link, рентгенофазовый анализ слоев ВТСП проведен на дифрактометре Ultima IV фирмы Rigaku.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. За представлено РЭМ-изображение отдельных фрагментов поперечного сечения композиционной ленты MgB_2 в исходном состоянии. Видны узкие прослойки легированного соединения MgB_2 в сложной композиционной оболочке из железа, никеля и в середине меди. Не все прослойки одинаково плотные. При шлифовке и полировке из них неравномерно выкрашивается порошок. При высоком разрешении (×3000)

(рис. 36, 3в) в структуре выделяются грубые конгломераты зерен и крестообразные трещины. При шлифовке и полировке в обойме со сплавами Вуда в промежутках между зернами MgB_2 наблюдаются компоненты, содержащиеся в сплаве Вуда (свинец, олово, цинк). Это установлено в результате микроанализа светлых выделений, наблюдаемых в микроскопе с высоким разрешением (рис. 3в).

После воздействия ударными волнами структура прослоек существенно изменяется. Вопервых, зерна прослойки MgB_2 подвергаются заметной сегрегации, исчезают крупные трещины. Материал прослоек при шлифовке и полировке практически не высыпается, исчезают светлые выделения, граница раздела с металлической оболочкой (железом) становится более ровной (рис. 4б). Во-вторых, увеличивается плотность, и становятся заметными равномерно распределенные округлые выделения размерами несколько микрон (рис. 4б, 4в).

Химический состав прослоек в исходном состоянии и после ударно-волнового воздействия на расстоянии 25 мм (пять ударов) по данным



Рис. 4. РЭМ-изображения поперечного сечения ленты MgB₂ после ударно-волнового воздействия: а – полное сечение; б – при увеличении ×283; в – при увеличении ×3000.

Спектр	В	С	0	Mg	Итог
1	5.38	42.76	36.22	15.64	100.00
2	10.70	35.92	23.21	30.17	100.00
3	8.80	42.83	31.98	16.39	100.00
4	22.00	29.21	16.60	32.19	100.00
5	18.43	30.67	21.38	29.51	100.00
Среднее значение	13.06	36.27	25.87	24.78	99.98

Таблица 1. Химический состав (мас. %) прослойки MgB₂ в исходной ленте

Таблица 2. Химический состав (мас. %) прослойки MgB_2 после обработки ударными волнами

Спектр	В	С	0	Mg	Итог
1	46.39	18.44	2.21	32.96	100.00
2	40.02	20.04	8.22	31.72	100.00
3	40.97	26.04	10.32	22.67	100.00
4	27.69	25.88	12.96	33.47	100.00
5	31.54	40.93	11.74	15.79	100.00
Среднее значение	37.32	26.26	9.09	27.32	99.99

микроанализа (по пяти спектрам в различных зонах прослоек) представлен в табл. 1 и 2. Видно, что в прослойках MgB₂ распределение двух основных компонентов (бора и магния) и легирующих компонентов (углерода и кислорода) неоднородное. В то же время в образце после ударноволнового воздействия заметно снижается содержание углерода и кислорода, и это приводит к увеличению процентного содержания магния и бора. При сравнении средних показателей по пяти спектрам концентрация бора и магния после ударов, соответственно, увеличивается (от 13.06 до 37.32 мас. % и от 24.78 до 27.32 мас. %), а концентрация углерода и кислорода уменьшается (от 36.27 до 26.26 мас. % и от 25.87 до 9.09 мас. %). Связано это может быть с тепловым воздействием плазмы и с различной степенью загрязнения поверхности шлифов прослоек MgB₂ в процессе их полировки. Равномерность распределения всех элементов (гомогенность) в исследуемых спектрах после ударного воздействия возрастает. Указанные структурные превращения и изменения химического состава являются основными причинами увеличения токонесущей способно-



Рис. 5. Вольт-амперные характеристики ленты MgB_2 после ударно-волнового действия на расстоянии 25 мм (пять ударов). Измерения проведены при 4.2 К в поперечном магнитном поле: 3 (1); 4 (2); 5 (3); 6 (4); 8 (5); 9 Тл (6).



Рис. 7. Зависимость критического тока от индукции продольного магнитного поля для лент MgB_2 после ударного воздействия на расстоянии: 25 (1); 35 (2); 40 мм (3) (пять ударов). Измерения проведены при температуре 4.2 К.

сти лент MgB_2 , подвергнутых ударам (рис. 5 и 6). При анализе ВАХ лент после ударов на расстоянии 25 мм (пять ударов), критический ток в поперечном магнитном поле 3 Тл достигает более 100 А, а в исходном образце (рис. 6) критический ток в указанном поле равен 25 А. Наиболее заметна разница критических токов в магнитном поле 2 Тл. Критический ток в исходной ленте равен 150 А, а после ударов на расстоянии 45 мм он достигает 225 А. С понижением магнитного поля при величинах индукции менее 2 Тл по данным экстраполяции эта разница должна возрастать и



Рис. 6. Зависимость критического тока от индукции поперечного магнитного поля для лент MgB_2 в исходном состоянии (*1*) и после ударного воздействия на расстоянии 45 мм (*2*) (один–три удара) и 40 мм (*3*) от анода (три–пять ударов). Измерения проведены при температуре 4.2 К.



Рис. 8. Температурная зависимость комплексной магнитной восприимчивости χ ленты MgB₂ в исходном состоянии (1, 2) и после ударно-волнового воздействия (3, 4) (расстояние от образца до анода 30 мм, пять ударов): 1, 3 – действительная часть; 2, 4 – мнимая часть.

дальше. Однако из-за отсутствия более мощного источника постоянного тока измерения критических токов в полях ниже 2 Тл на данном этапе не проведены.

В параллельном магнитном поле до 4 Тл величина критического тока заметно выше, чем в поперечном поле, в интервале 5–9 Тл критический ток с изменением расстояния между образцом и плазменным анодом (от 25 до 40 мм) при нанесении пяти ударов изменяется мало (рис. 7). С понижением индукции магнитного поля до 4 Тл критический ток лент после ударов на расстоянии 25 мм заметно выше (120 A), чем при ударах на расстояниях 35 и 40 мм (100 A). При сравнении с исходным образцом эта разница в критических

токах становится более очевилной.

По данным измерений магнитной восприимчивости в переменном магнитном поле с частотой 23 Гц образца ленты в зоне удара температура сверхпроводящего перехода оказалась равной 40.8 К (рис. 8) и превосходит T_c , известные в литературе, более чем на 1 К. Тем самым подтверждается положительный эффект ударно-волнового воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значительное повышение критического тока композиционных лент на основе соединения MgB_2 в поперечном и параллельном магнитном поле в интервале 2–5 Тл достигнуто в результате ударно-волнового воздействия на расстоянии 25–45 мм от анода.

Повышение критического тока и T_c объясняется возрастанием плотности сверхпроводящих прослоек, грануляцией зерен, упрочнением связей между зернами на границе раздела с металлической оболочкой, изменением химического состава и формированием эффективных центров пиннинга под действием волновых ударов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-12-10351.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aragwala P., Srivastava M.P., Dheer P.N. et al. // Physica C. 1999. V. 313. P. 87. doi 10.1016/S0921-4534(98)00682-0
- 2. *Nikulin V.Ya., Ivanov L.I., Mikhailova G.N et al.* // Acta Technica. 2011. V. 56. P. T238.
- Антонова Л.Х., Боровицкая И.В., Горшков П.В. и др. // Физика металлов и металловедение. 2011. Т. 111. Вып. 2. С. 162.
- 4. *Михайлов Б.П., Иванов Л.И., Шамрай В.Ф. и др. //* Перспективные материалы. 2009. № 6. С. 57.
- 5. *Mikhailova G., Antonova L., Borovitskaya I. et al.* // Phys. Stat. Sol. C. 2013. V. 10. № 4. P. 689.
- 6. Antonova L.Kh., Borovitskaya I.V., Gorskov P.V. et al. // Phys. Metals Metallogr. 2011. V. 111. № 2. P. 158.
- Kolokol'tsev V.N., Mikhailov B.P., Ivanov L.I. et al. // Inorgan. Mater.: Appl. Res. 2012. V. 3. № 2. P. 120. doi 10.1134/S2075113312020104
- Михайлов Б.П., Иванов Л.И., Боровицкая И.В. и др. // Докл. акад. наук. Техн. физика. 2012. Т. 442. № 5. С. 614.
- Михайлов Б.П., Иванов Л.И., Шамрай В.Ф. и др. // Тез. докл. Нац. конф. по прикладной сверхпроводимости НКПС-І. Москва, 2011. С. 235.
- 10. *Mikhailov B.P., Ivanov L.I., Borovitskaya I.V. et al.* // Dokl. Phys. 2012. V. 57. № 2. P. 61.
- Антонова Л.Х., Боровицкая И.В., Горшков П.В. и др. // Докл. акад. наук. Техн. физика. 2009. Т. 428. № 4. С. 471.
- 12. Mikhailova G., Antonova L., Borovitskaja I. et al. // Phys. Stat. Sol. 2012. V. 19. P. 1. doi 10.1002/pssc.201200697
- 13. *Михайлов Б.П., Никулин В.Я., Силин П.В. и др. //* Перспективные материалы. 2013. № 10. С. 70.
- 14. *Мезох З.И., Янушкевич В.А, Иванов Л.И.* // Физика и химия обработки материалов. 1971. № 4. С. 163.
- 15. Дехтяр И.Я., Иванов Л.И., Карлов Н.В. и др. // Квантовая электроника. 1976. Т. 3. № 4. С. 844.

Action of Shock Waves Pulses on Structure and Superconducting Parameters of MgB₂ Tapes

B. P. Mikhailov, V. Ya. Nikulin, A. B. Mikhailova, P. V. Silin, I. V. Borovitskaya, S. V. Shavkin, A. A. Serov

The possibility of increasing the critical current of MgB_2 tapes containing carbon and oxygen additives under the action of shock waves produced by pulsed plasma in the Plasma Focus installation is demonstrated. The microstructure of the tapes and the chemical composition of superconducting layers in the initial state and after impact at different distances between the samples and the plasma anode (from 20 to 45 mm) and the number of shocks (from three to five) are investigated. The regularities of the change in critical current as a function of the magnitude of the transverse and longitudinal magnetic fields in a range 2–9 T are studied at 4.2 K. It is established that as a result of the impact and thermal action of the plasma, the superconducting interlayers are densified, the grains are fragmented, the composition is homogenized, and the chemical composition is changed. This promotes to increase the critical current by 50–80 A in transverse magnetic fields 2–3 T.

Keywords: shock wave, plasma focus critical current, current-voltage characteristics, external magnetic field, macro- and microstructure of tapes, density of superconducting layers.