

Влияние условий ударно-волнового воздействия плазмы на структуру и токонесущую способность многослойных высокотемпературных сверхпроводящих лент

**Б. П. Михайлов, В. Я. Никулин, П. В. Силин, А. Б. Михайлова,
Н. А. Минеев, Д. Гайда, В. Ф. Шамрай**

Исследовано влияние ударно-волнового воздействия (УВВ) на структуру и критические токи многослойных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) лент фирмы EAS-E HTS (VAC). УВВ осуществляли с использованием установки типа плазменный фокус (ПФ). Установлено, что в зависимости от условий УВВ — расстояния от источника плазмы (анода ПФ) и количества ударно-волновых импульсов достигается повышение критического тока на 20% и более, как в собственном магнитном поле, так и в магнитных полях в интервале 0,5 – 2,5 Тл. В магнитных полях более 3 Тл эффект повышения критического тока не наблюдается. Микроструктурные исследования выявили как уплотнение, так и разрушение отдельных ВТСП прослоек в зоне удара в зависимости от условий УВВ. Наиболее сильная деградация структуры и критического тока лент проявляется на образцах, обработанных на расстояниях 25 – 30 мм от анода ПФ. При увеличении расстояния до 35 – 65 мм критический ток повышается и превышает исходные значения необработанных лент (75 – 85 А). После УВВ фазовый состав ВТСП прослоек по данным рентгено-фазового анализа (РФА) практически не изменяется. Толщина лент в местах нанесения ударов в зависимости от количества ударов и расстояния от анода может уменьшаться за счет уплотнения и возрастать из-за разбухания ленты.

Ключевые слова: сверхпроводники, многослойные ленты, плазма, ударные волны, микроструктура, критический ток, магнитные поля.

The article presents the results of the investigation of the influence of shock-wave effects on the structure and the critical currents of multilayer high-temperature superconductors - HTS tapes produced by the EAS-E HTS (VAC). Shock-wave exposure was carried out using an installation such as a plasma focus (PF). It was experimentally found the increasing of the critical current by 20% or more in its own magnetic field and the external magnetic fields in the range 0.5 – 2.5 T. The increasing depends on the conditions of the shock-wave treatment (the distance from a plasma source (PF anode) and the number of shock wave pulses). In the magnetic fields of more than 3 T the effect of increasing of the critical current is not observed. Microstructural studies have revealed both a seal and destruction of the individual layers of HTS in the strike zone depending on the conditions of the impact. The most severe degradation of the structure and the critical current is shown on the tape samples treated at distances 25 – 30 mm from the PF anode. At the distance of 35 – 65 mm, the critical current increases and exceeds the reference values of untreated tapes (75 – 85 A). After the shock-wave treatment the phase composition of HTS layers by XRD little changed. Depending on the amount of shock pulses and distance from the anode the in the area of SW impact the tape thickness is reduced due to the compression or is increased due to swelling of the tape.

Keywords: superconductors, multilayer tapes, plasma, shock-wave, microstructure, critical current, magnetic fields.

Введение

Токонесущая способность ВТСП-лент, полученных методом “порошок в трубе” зависит от струк-

туры ВТСП прослоек — их плотности, размера зерен, межзеренных контактов, равномерности распределения ВТСП-порошка по длине, текстуры, наличия эффективных центров пиннинга (nano-выделений,

структурных несовершенств, пор и т.д.). Существует множество различных способов воздействия на структуру ВТСП-прослоек (разные методы деформации, прокатки, прессования, термообработки, легирования и др. [1 – 7]).

В последнее время установлена возможность повышения токонесущей способности ВТСП-лент за счет воздействия ударных волн (УВ) [8 – 13]. При этом воздействие УВ проявляется в уплотнении сверхпроводящих ВТСП-прослоек за счет кратковременного нагрева и высокого давления в зоне удара, в образовании в прослойках дополнительных наноразмерных дефектов (дислокаций), играющих роль центров пиннинга, в дроблении и измельчении зерен и в ряде других факторов. Наряду с повышением критического тока в зависимости от условий и режимов ударного воздействия (количества ударов, расстояний от источника УВ и ее мощности и ряда других факторов) наблюдается также деградация токонесущих свойств. В связи с этим возникает необходимость оптимизации условий и режимов ударного воздействия (количества ударов, расстояния образца от плазменного анода и ряда других). Например, мощности плазменного удара, толщины и механических свойств материала защитного экрана и других факторов, которые должны быть установлены и оптимизированы.

Цель работы — исследовать влияние условий ударно-волнового воздействия (УВВ) (количества ударов и расстояния поверхности образца от плазменного анода) на структуру и критические токи многослойных высокотемпературных сверхпроводящих лент фирмы EAS-E HTS (VAC).

Методика эксперимента

Эксперименты по ударно-волновому воздействию (УВВ) выполняли на установке Тюльпан (ПФ-4) в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН. Для создания ударных волн кумулятивный плазменный поток, генерируемый в установках такого типа, направлялся на образец, экранированный фольгой из молибдена толщиной 0,1 мм. При воздействии такого потока на мишень в последней возникают УВ высокой интенсивности. УВВ затем передаются на образцы ВТСП через (2 мм) слой эпоксидной смолы (без отвердителя), отделяющий образец от молибденовой фольги. Эта фольга также обеспечивает защиту образца ВТСП от прямого плазменного и термического воздействия плазменного импульса. Для предотвращения смещения образца при плазменных ударах образец фиксировался в алюминиевой кювете. Такая конструкция позволяет равномерно передавать

давление на площади кольца диаметром 8,0 мм. Временной интервал между импульсами составлял 1,5 мин. Расстояние от поверхности образца до анода изменялось от 25 до 80 мм, количество ударных импульсов от 1 до 15. Удары наносили как с одной стороны ленты, так и с двух сторон.

Параметры установки ПФ-4: энергия в конденсаторном накопителе — 4 кДж. Время воздействия на мишень было постоянным — 10^{-7} с. Плотность потока энергии на мишень при скорости разлета пинча $\sim 10^7$ см/с достигает величин порядка $\sim 10^8 - 10^{10}$ Вт/см². Установка ПФ-4 работала при заполнении разрядной камеры аргоном до давления 2 Торр.

На исходных лентах фирмы (EAS-E HTS (VAC)) и после УВВ исследована микроструктура в продольном и поперечном сечении, проведен рентгено-фазовый анализ на дифрактометре Ultima IV фирмы Rigaku, измерена толщина лент и толщина отдельных ВТСП-прослоек, микротвердость оболочки и ВТСП-прослоек, химический состав прослоек и выделений, наблюдавшихся в них, проведены измерения электрофизических свойств (вольтамперные характеристики (ВАХ), полевая зависимость критического тока — $I_c(B)$, зависимость критического тока лент от количества ударов — $I_c(n)$ и расстояния от образца до анода — $I_c(t)$, температура сверхпроводящего перехода — T_c). Критерием определения критического тока являлось напряжение $U = 1$ мкВ.

Экспериментальные результаты

На рис. 1 a, b представлены микроструктура продольного и поперечного сечения лент фирмы EAS-E HTS (VAC) в исходном состоянии. На приведенных микроструктурах хорошо различаются ВТСП-прослойки и прослойки серебра. В продольном сечении толщина ВТСП прослоек более однородна, чем в поперечном сечении. В прослойках наблюдаются поры и мелкие трещины.

Толщина прослоек неоднородна (рис. 1 c), наблюдаются продолговатые трещины длиной от нескольких мкм до 5 – 10 мкм и поры. Указанные дефекты снижают плотность материала и, соответственно, критический ток ленты. После 2-кратного ударного воздействия плазмы на расстоянии 25 мм (рис. 2 a) в зоне удара наблюдается полное растрескивание практически всех ВТСП-прослоек, при этом прослойки из серебра сохраняют целостность. Однако необходимо обратить внимание на то, что структура ВТСП-слоев в зоне удара около трещин становится более плотной.

При возрастании количества ударов до 10 (рис. 2 b) в эпицентре ударов возрастает количество

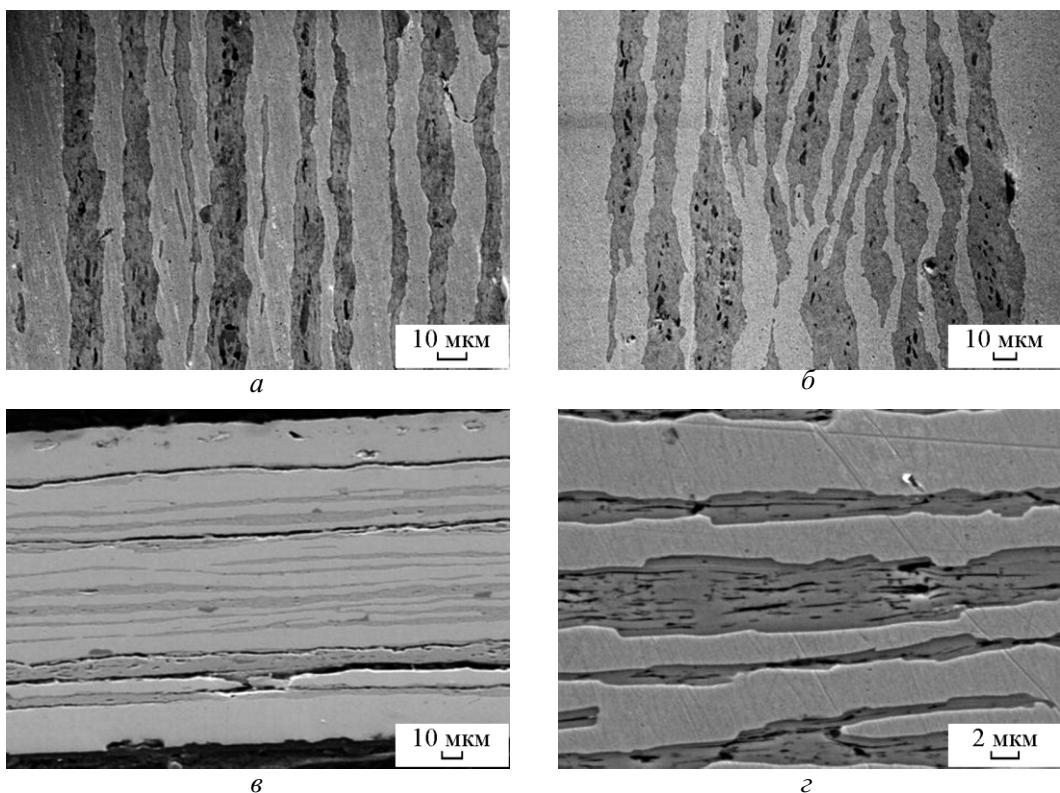


Рис. 1. Микроструктура продольного (*a*) и поперечного (*б* – *в*) сечений исходной Bi-2223 ленты EAS-E-HTS (VAC).

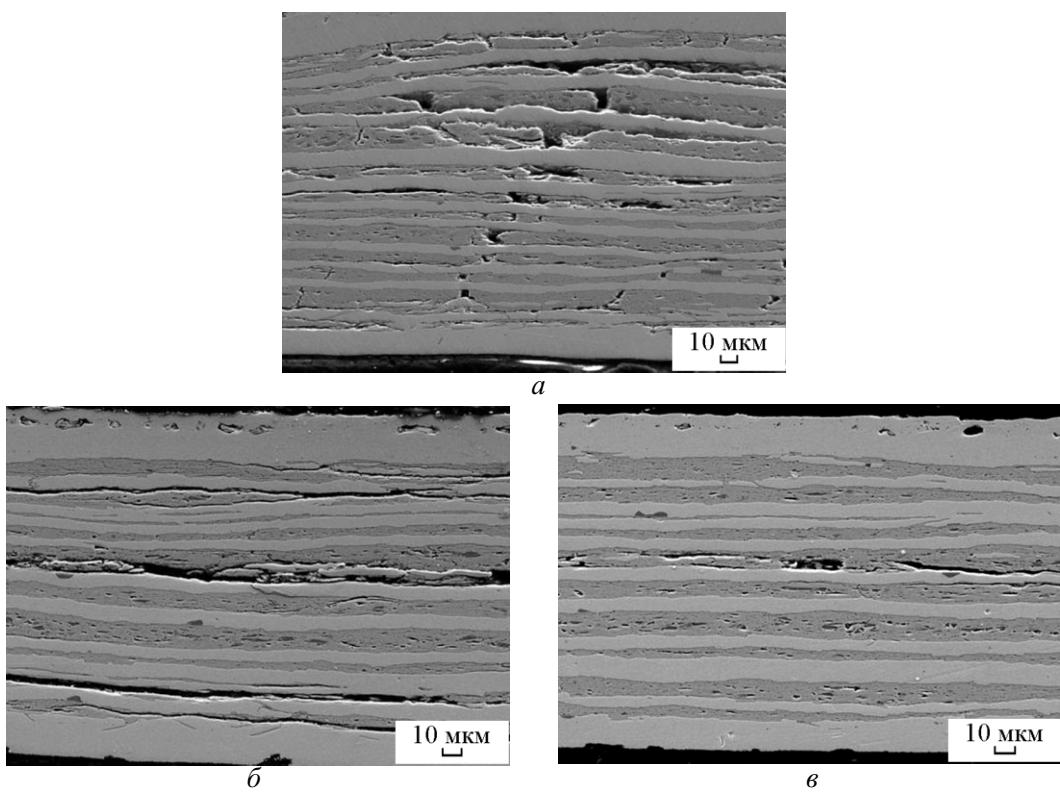


Рис. 2. Микроструктура поперечного сечения ленты EAS-E-HTS (VAC) после УВВ на расстоянии 25 мм при количестве ударов: *a* – 2, *б*, *в* – 10; *б* – середина зоны удара, *в* – край зоны удара.

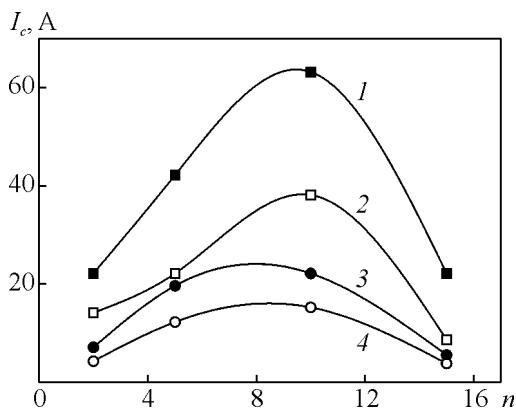


Рис. 3. Зависимости критического тока лент I_c после УВВ (при 77 К) от количества ударов n , проведенных на расстоянии 25 мм на ленте EAS-E-HTS (VAC) в магнитных полях, Тл: 1 – 1,0; 2 – 1,5; 3 – 2,0, 4 – 2,5.

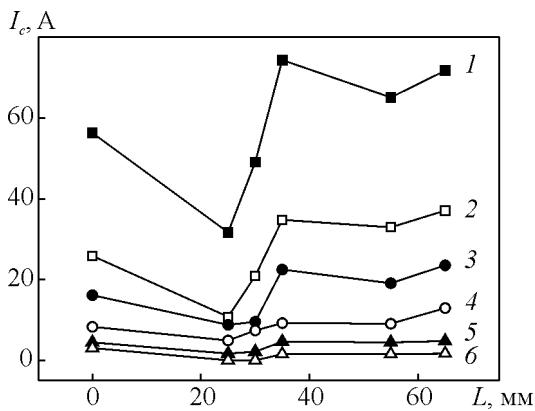


Рис. 4. Влияние расстояния L от анода до поверхности ленты на величину критического тока I_c ленты EAS-E-HTS (VAC) при 77 К в разных магнитных полях, Тл: 1 – 0, 2 – 0,5, 3 – 1, 4 – 2, 5 – 3, 6 – 4. Количество ударов – 10.

продольных трещин. Однако поперечные трещины в этом случае отсутствуют, а по мере удаления от эпицентра ударов структура становится более плотной (рис. 2в).

Таким образом, УВ играет двойкую роль — она может разрушать и одновременно уплотнять ВТСП-прослойки. Конечный результат в значительной степени зависит от условий проведения УВВ.

На рис. 3 приведены закономерности изменения критического тока лент от количества ударов, проведенных на расстоянии 25 мм. Видно, что в интервале от 8 до 10 ударов критический ток в магнитных полях 1 – 2,5 Тл имеет максимальные значения. При этом структура прослоек наиболее плотная.

Результаты исследований влияния расстояния от плазменного источника до поверхности образца на

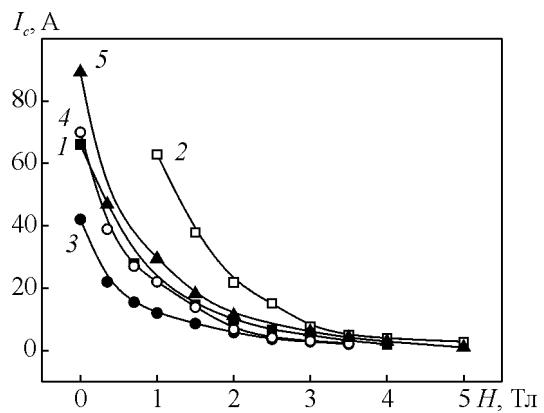


Рис. 5. Полевые зависимости критического тока (при 77 К) в параллельном магнитном поле Bi-2223 ленты фирмы EAS-E HTS (VAC) в исходном состоянии – 5 и после УВВ на расстоянии 25 мм при различном количестве ударов: 1 – 5, 2 – 10, 3 – 15, 4 – 2.

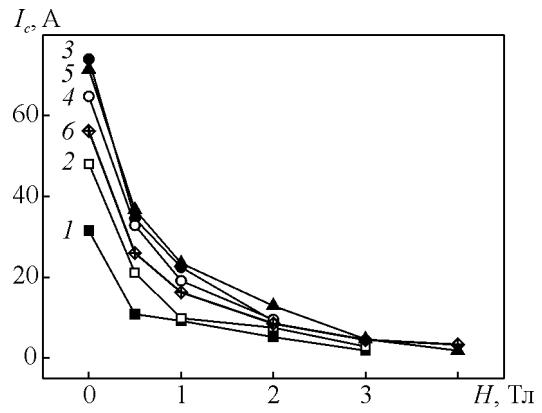


Рис. 6. Полевая зависимость критического тока I_c многослойной ВТСП ленты фирмы EAS-E HTS (VAC) после УВВ (при 77 К) при одинаковом количестве ударов – 10 на различном расстоянии от анода, мм: 1 – 25, 2 – 30, 3 – 35, 4 – 55, 5 – 65, 6 – без воздействия УВВ.

величину критического тока лент в магнитных полях 0 – 4 Тл приведено на рис. 4. На представленных зависимостях видно, что при ударах на расстоянии 25 мм величина критического тока минимальна, а при ударах на расстояниях от 35 мм до 65 мм величина критического тока заметно (20%) выше исходного значения. По мере повышения напряженности магнитного поля влияние расстояния ослабевает.

Полярные зависимости величины критического тока лент, обработанных при различном количестве ударов (от 2 до 15) на расстоянии 25 мм, представлены на рис. 5. Видно, что только в случае 10 ударов критический ток превышает значения исходного образца ленты.

При изучении полевых зависимостей критического тока лент, обработанных на расстояниях от 25

до 65 мм (рис. 6) установлено, что только при обработке на расстояниях от 35 до 65 мм величина критического тока превышает значения токов исходной необработанной ленты в полях 0–2,0 Тл.

При проведении двухсторонней ударной обработки лент на расстояниях 30 мм при количестве ударов 2 заметного эффекта повышения критического тока не наблюдали.

Результаты проведенных исследований показывают возможность существенного повышения токонесущей способности ВТСП-лент за счет кратковременного ударного воздействия плазменного пинча при оптимальных условиях удара. На данном этапе эксперименты проведены при различном количестве ударов, на различном расстоянии от плазменного источника постоянной мощности. Интерес представляют эксперименты при регулировании мощности плазменной установки, температуры образцов лент в момент нанесения ударов и изменении других технологических параметров.

Выводы

1. На Bi-ВТСП-лентах, произведенных фирмой EAS-E HTS (VAC), за счет оптимизации условий плазменного УВВ (количества ударов и расстояния поверхности образца от плазменного анода) установлена возможность повышения критического тока на 20–30 % по сравнению с исходной лентой в магнитных полях 0–2,5 Тл при температуре 77 К.

2. Наиболее значительные повышения критических токов лент по сравнению с исходными значениями достигнуты при ударах, нанесенных на расстояниях 35–65 мм, в то же время при ударах на более близких расстояниях (25–30 мм) наблюдается снижение критического тока.

3. Оптимальное количество наносимых ударов УВВ для указанных лент — от 8 до 10.

4. Микроструктурными исследованиями попечного и продольного сечения лент в исходном состоянии и после УВВ установлено образование трещин в ВТСП-прослойках после ударов на близких расстояниях 23–30 мм и их уплотнение после ударов на расстояниях 35–65 мм.

5. Для дальнейшей оптимизации технологического процесса УВВ требуется проведение выбора оптимальной мощности удара, материала и толщины металлического экрана и температуры обрабатываемых образцов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-02-00854 –а.

Литература

1. Daumling M., Grasso G., Grindatto D.P. et al. Hot deformation effects on critical currents in (Bi,Pb)Sr₂Ca₂Cu₃O_x silver-sheathed tapes. *Physica C*, 1995, v. 250(1-2), p. 30–38.
2. Ignatov H., Nazarova E., Zahariev A. et al. Deformation effects on the structure and properties Y_{1-x}Ca_xBa₂Cu₃O_{7-δ} (x = 0, 0.3) Tapes Produced by OPIT Method in the Ag-Tube. *J. Supercond. Nov. Magn.*, 2008, v. 21, p. 69–73.
3. Yamada Y., Takachachi K., Kobayashi H. et al. Epitaxial microstructure and defects effective for pinning in Y(Re)Ba₂Cu₃O_{7-x} coated conductors. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, v. 87, p. 13202–13207.
4. Chen X.P., Li M.Y., Liu Q., Han Z. Effect of secondary phases evolution in the first sintering process on the critical current density of Bi-2223 Ag tapes. *Physica C*, 2009, v. 469, p. 116–119.
5. Михайлов Б.П., Руднев А.И., Бобин П.В., Кадырбаев А.Р., Михайлова А.Б., Покровский С.В. Функциональные характеристики композита Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10+8/ZrN}. Письма в ЖЭТФ, 2006, т. 32, вып. 20, с. 70–76.
6. Руднев И.А., Михайлов Б.П., Бобин П.В. Намагниченность и критический ток высокотемпературных сверхпроводников с искусственными центрами пиннинга. Письма в ЖТФ, 2005, т. 31, вып. 4, с. 88–94.
7. Михайлов Б.П., Кадырбаев А.Р., Михайлова А.Б. Современное состояние и перспективы разработки и применения сверхпроводников на основе ВТСП соединений. Журнал Функциональных материалов, 2008, № 106.08, с. 203–212.
8. Antonova L.Kh., Borovitskaya I.V., Gorshkov P.V., Demikhov E.I., Ivanov L.I., Krokhin O.N., Mikhailova G.N., Menushenkov A.P., Nikulin V.Ya., Oginov A.V., Podlivaev A.I., Pokrovskii S.V., Rudnev I.A., Troitskii A.V. Effect of Shock Waves on the Current-Carrying Properties of HTSC YBCO(123) Tape. *Doklady Physics*, 2009, v. 54, no. 10, p. 463–465.
9. Михайлов Б.П., Иванов Л.И., Боровицкая И.В., Крохин О.Н., Руднев И.А., Троицкий А.В., Антонова Л.Х., Никулин В.Я., Майоров А.Н., Покровский С.В. Влияние ударно-волнового воздействия на критический ток висмутовых (2223) ВТСП-лент первого поколения. Доклады Академии наук, Техническая физика, 2012, т. 442, № 5, с. 614–616.
10. Михайлов Б.П., Иванов Л.И., Шамрай В.Ф., Никулин В.Я., Михайлова Г.Н., Нижанковский В.И., Руднев И.А., Горшков П.В. Влияние импульсной высокоплотной плазмы на сверхпроводящие свойства многожильной Bi-2223 ленты. Перспективные материалы, 2009, № 6, с. 57–60.
11. Mikhailova G., Antonova L., Borovitskaya I., Krochin O., Majorov A., Mikhailov B., Nikulin V., Silin P., Troitskiy A. The shock waves application for increasing of a critical current in composite HTSC. *Physica status solidi C*, 2013, v. 10, no. 4, p. 689–692.
12. Nikulin V.Ya., Ivanov L.I., Mikhailova G.N., Mikhailov B.P., Troitskii A.V., Antonova L.K., Borovitskaja I.V.,

- Gorshkov P.V., Peregudova E.N., Pokrovskij S.V., Rudnev I.A. Effect of Shock Waves on current-carrying characteristics of HTSC. *Acta Technica*, 2011, v. 56, p. T238 – T244.
13. Antonova L.Kh., Borovitskaya I.V., Gorskov P.V., Demikhov E.I., Ivanov L.I., Krokhin O.N., Mikhailova G.N., Mikhailov B.P., Nikulin V.Ya., Pokrovskii S.V., Rudnev I.A., Troitskii A.V. Application of Shock Waves for the Improvement of Current-Carrying Properties of YBCO(123) and Bi(2223) HTSC Tapes in magnetic Fields. *The Physics of Metals and Metallography*, 2011, v. 111, no. 2, p. 158 – 164.

Статья поступила в редакцию 28.05.2013 г.

Михайлов Борис Петрович — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, доктор технических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области материаловедения сверхпроводящих материалов. E-mail: borismix@imet.ac.ru.

Никулин Валерий Яковлевич — Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией. Специалист в области физики плотной плазмы. E-mail: vnik@lebedev.ru.

Силин Павел Викторович — Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физики плотной плазмы. E-mail: silinp@mail.ru

Михайлова Александра Борисовна — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, кандидат технических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области кристаллохимии сверхпроводников. E-mail: sasham1@imet.ac.ru.

Минеев Николай Александрович — Научно-исследовательский ядерный университет МИФИ, инженер-физик. Специалист в области измерения электрофизических свойств сверхпроводящих материалов. E-mail: kolyamineev@gmail.com

Gayda Daniel — Международная лаборатория сильных магнитных полей и низких температур (г.Вроцлав, ПНР). Специалист в области материаловедения сверхпроводящих материалов. E-mail: gajda@ml.pn.wroc.pl

Шамрай Владимир Федорович — Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией. Специалист в области кристаллохимии сверхпроводников. E-mail: shamray@imet.ac.ru.