

Поведение в магнитных полях и механические свойства низкоомных соединений $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 2G лент

А. В. Троицкий, Л. Х. Антонова, Г. Н. Михайлова,
Б. П. Михайлов, Д. В. Просвирнин, А. В. Маркелов,
С. В. Самойленков, А. А. Молодык

Исследованы электрические свойства контактов, полученных с помощью пайки припоями Розе и ПОС сверхпроводящих ленточных проводников $GdBCO$ второго поколения, во внешнем магнитном поле до 5 Тл при температуре кипения жидкого азота. Контактное сопротивление при 77 К в случае припоя ПОС примерно вдвое ниже, чем для сплава Розе. Рост магнитосопротивления контактов от поля незначительный, не зависит от взаимной ориентации ленты и магнитного поля и насыщается в полях порядка 3 Тл для обоих припоев. Измерена механическая прочность на растяжение исходных ленточных проводников и контактов при комнатной температуре. Предел прочности контактов с применением ПОС более чем вдвое превышает тот же параметр для контакта, сделанного сплавом Розе. В последнем случае предел прочности на растяжение ниже, чем критическое напряжение деградации сверхпроводника.

Ключевые слова: ВТСП ленты, магнитное поле, припои, сопротивление контактов, механические свойства.

Введение

В настоящее время серийно выпускаемые ленточные проводники из высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) на основе сложных купратов меди имеют высокую плотность критического тока, хорошие механические свойства и являются перспективными для создания мощных магнитных установок [1–3]. Поэтому получение надежных контактов для соединения таких проводников представляет большой интерес. Ранее были опубликованы результаты исследований свойств электрических контактов спаянных ВТСП лент на основе $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [4–6]. В [7] описаны сверхпроводящие контакты для $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ленты второго поколения, однако технология их изготовления чрезвычайно сложна. В ряде случаев возможно применение припоев для соединения сверхпроводников.

Цель настоящей работы — анализ электрических и механических свойств соединений между отрезками лент $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ с помощью припоев Розе и ПОС, исследования зависимости контактного сопро-

тивления в магнитных полях при азотных температурах.

Образцы и экспериментальные методы

В качестве образцов использовали ВТСП ленты 2G на основе соединения $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ шириной 4 мм и 12 мм (компания СуперОкс), полученные методом лазерного напыления [3]. Лента имеет следующую структуру (рис. 1): сверхпроводящий

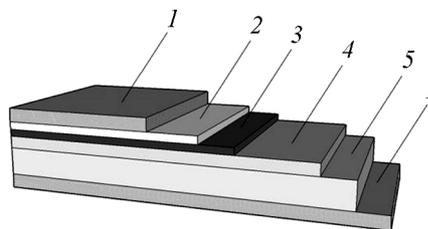


Рис. 1. Структура ВТСП-ленты производства компании СуперОкс-Япония (ширина 4 мм): 1 — слой меди 20 мкм, 2 — слой серебра 1,5 мкм, 3 — ВТСП — $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 1 мкм, 4 — буферные оксидные слои, 5 — хастеллой 60 мкм.

слой толщиной 1 мкм нанесен на буферные слои нанометровых размеров, сверху покрыт 1,5 мкм серебра. Подложка изготовлена из сплава хастеллой 276 толщиной 60 мкм. Стабилизирующее покрытие — пленка меди 20 мкм. Исходные ленточные сверхпроводники имели следующие критические параметры: критическая температура $T_c = 93$ К, критический ток $I_c = 130$ А при $T = 77$ К для ленты шириной 4 мм и 350 А — шириной 12 мм. Зависимость критического тока от магнитного поля для 4 мм ленты приведена на рис. 2.

Изготовление электрических контактов проводили методом соединения лент внахлест с припоями двух типов — сплава Розе и ПОС. Сплав Розе, согласно требованиям ТУ 6-09-4065-88, имеет следующий состав: $32 \pm 0,5$ % Pb, $18 \pm 0,5$ % Sn, $50 \pm 0,5$ % Bi, $T_{пл} = 94$ °С, удельное сопротивление $\rho = 67 \cdot 10^{-6}$ Ом·см⁻¹ [8]. Сплав ПОС61, согласно требованиям ГОСТ 21930-76, имеет состав: 59–61 % Sn, 39–41 % Pb, $T_{пл} = 190$ °С, удельное сопротивление $13,9 \cdot 10^{-6}$ Ом·см⁻¹ [9]. Для упрощения измерений сопротивления контактов длину контакта делали не более 5 мм. В этом случае сопротивление контакта при $T = 77$ К составляет ~ 100 нОм. Такие сопротивления относительно несложно измерять. Если сделать длину контакта больше, можно получить контакт с гораздо меньшим сопротивлением. Но целью нашей работы было не получение контакта с минимальным сопротивлением, а изучение зависимости сопротивления контакта от магнитного поля. Так как характер зависимости сопротивления качественно сделанного контакта от магнитного поля, по-видимому, определяется исключительно материалом припоя, для исследования этой зависимости лучше использовать контакты с большим сопротивлением.

Измерения электрического сопротивления полученных контактов проводили четырёх-зондовым

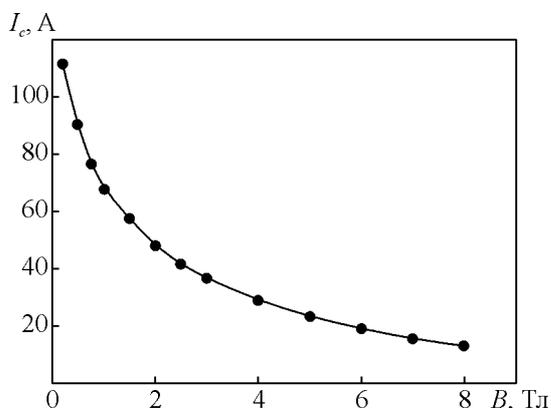


Рис. 2. Зависимость критического тока от магнитного поля $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ленты шириной 4 мм ($B \parallel I$).

методом на постоянном токе при $T = 77$ К, когда соединяемые ленты находились в сверхпроводящем состоянии. Магнитное поле создавалось с помощью безжидкостной магнитной установки на 8 Тл с криорефрижератором с отверстием диаметром 50 мм при комнатной температуре. В “теплый” объем криостата с магнитом заливали жидкий азот и помещали вставку с образцом, которая позволяла проводить измерения как в продольной, так и в поперечной ориентации контактной области относительно магнитного поля.

Механические свойства исходных лент и контактов определяли при статическом напряжении при комнатной температуре. Испытания проводили на установке Instron-5848, которая записывает диаграмму напряжения, выражающую зависимость удлинения образца от действующей нагрузки.

Результаты и обсуждение

Электрическое сопротивление контактов в магнитном поле

На рис. 3 представлено схематическое изображение поперечного сечения спаянного контакта лента-лента внахлест. Геометрическое расположение отрезков ленты было выбрано таким, чтобы слои сверхпроводника в обоих проводниках располагались на ближайшем возможном расстоянии. Длина спаянных контактов составляла 5 мм. Электрическое сопротивление контактов при $T = 77$ К составляло 190 нОм в случае использования сплава Розе в качестве припоя (№ 4) и 108 нОм — припоя ПОС (№ 3).

При электрических измерениях изучали контактное сопротивление между лентами $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ шириной 4 мм. На рис. 4а показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) контакта № 3 без магнитного поля $B = 0$ и в полях 1,0 и 4,0 Тл. Контакт сделан сплавом ПОС. На рис. 4б представлены ВАХ контакта № 4 ВТСП лент без магнитного поля и в поле 1 Тл. Контакт лент сделан сплавом Розе. Измерения ВАХ проводили в магнитном поле параллельном контакту.

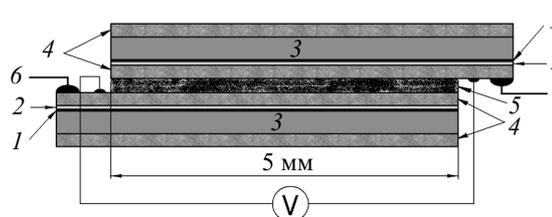


Рис. 3. Схематическое изображение поперечного сечения контакта ВТСП лент: 1 — ВТСП плёнка $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, 2 — серебро, 3 — подложка, 4 — стабилизирующая медь, 5 — припой, 6 — токовводы.

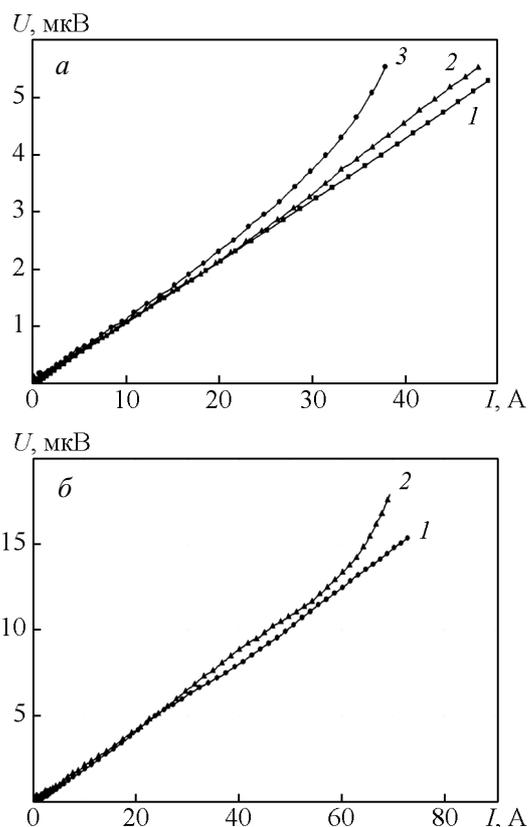


Рис. 4. ВАХ: а — контакта № 3 (сплав ПОС) без поля $B = 0$ (1) и в магнитных полях, Тл: 2 — 1,0; 3 — 4,0; б — контакта № 4 (сплав Розе) без магнитного поля (1) и в поле 1 Тл (2). Длина контактов 5 мм. Магнитное поле параллельно контакту.

Из рис. 4 видно, что на ВАХ имеются линейные участки. Чем больше магнитное поле, тем они короче. Нелинейность на характеристиках возникает, когда ток, идущий через контакт, превышает критический ток хотя бы в одной из соединённых ВТСП лент. Сопротивление контакта определяется из линейной участка вольт-амперной характеристики по закону Ома в некоторых точках. Затем эти данные усредняются. Усреднение по большому количеству точек позволяет снизить погрешность измерений.

На рис. 5 приведены зависимости контактного сопротивления от величины индукции внешнего магнитного поля для сплава Розе и ПОС, соответственно, измеренного в продольном поле при $T = 77$ К, в условиях, когда ленточные проводники находятся в сверхпроводящем состоянии. Сопротивление контакта из сплава Розе во всём исследованном интервале магнитных полей существенно (приблизительно в два раза) выше, чем сопротивление контакта из ПОС. Это объясняется более высоким удельным сопротивлением сплава Розе. Из графиков видно, что зависи-

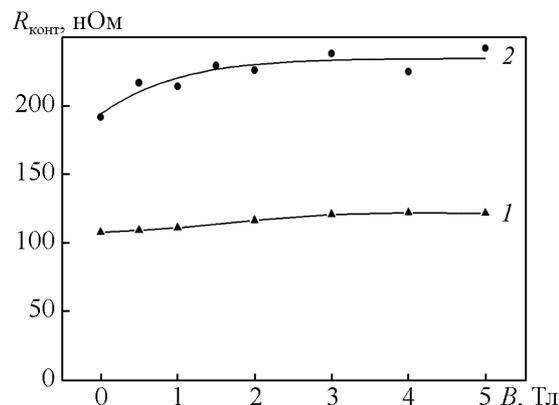


Рис. 5. Зависимость сопротивления контактов: 1 — № 3 (сплав ПОС), 2 — № 4 (сплав Розе) от магнитного поля при $T = 77$ К. Длина контактов 5 мм.

мость от магнитного поля для обоих контактных сопротивлений слабая и выходит на насыщение при $B = 3$ Тл. Максимальное увеличение сопротивления контакта для сплава Розе составляет примерно 26,3%, а для ПОС — 11,3% в поле 3 Тл. Измерения в поперечном поле дали аналогичный результат. Это неудивительно, так как в сплавах анизотропии свойств не наблюдается.

Механические свойства

Тестирование механических свойств проводили на 6 образцах — на двух исходных лентах 4 и 12 мм и на 4-х контактах с применением ПОС и сплава Розе. Результаты определения предела пропорциональности для каждого образца и предел прочности приведены в табл. 1. Диаграммы растяжения для контактов № 3 и № 4, сопротивление которых измеряли в данной работе, представлены на рис. 6. Из табл. 1 и рис. 6 видно, что контакты, сделанные сплавом ПОС, в несколько раз прочнее, чем контакты со сплавом

Таблица 1

Механические свойства при 20 °С исходных ВТСП лент GdBCO (1, 2) и электрических контактов (3 – 6), сделанных припоями ПОС и сплавом Розе, длина образцов 62 мм

№	Ширина, мм	Предел пропорциональности, МПа	Предел прочности, МПа	Примечание
1	4	843	980	Исходная лента
2	12	678	1109	Исходная лента
3	4	862	919	Сплав ПОС
4	4	—	342	Сплав Розе
5	12	—	118	«—»
6	12	—	567	Сплав ПОС

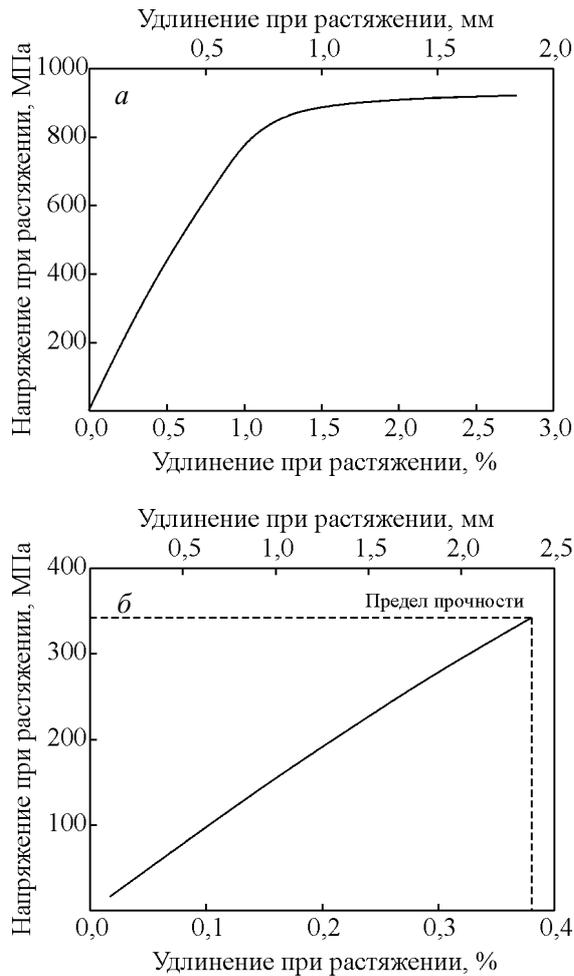


Рис. 6. Диаграмма растяжения контактов двух 4-мм лент $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$: *a* – контакт № 3 (сплав ПОС), *б* – контакт № 4 (сплав Розе). $T = 20^\circ C$. Длина контактов 5 мм.

Розе. Интересно отметить, что прочность контактов лент шириной 12 мм оказывается заметно ниже, чем прочность контактов лент шириной 4 мм как для сделанных сплавом ПОС, так и для контактов, сделанных сплавом Розе (табл. 1). Возможно, так происходит потому, что на более широкой ленте труднее получить качественный однородный контакт.

Контакты, сделанные сплавом ПОС, оказались очень прочными, несмотря на то что их длина всего 5 мм. Предел прочности контакта № 3 близок к пределу прочности исходной ленты (табл. 1). Однако необходимо заметить, что кроме предела прочности на разрыв, для ВТСП ленты существует еще один важный параметр — критическое напряжение деградации сверхпроводника. Для 2G ВТСП лент производства SuperPower оно равно приблизительно

700 МПа [10]. В настоящей работе этот параметр не измеряли, но можно предположить, что он примерно такой же и для исследованных образцов. Прочность контакта № 3 равна 919 МПа, что существенно превышает указанную величину критического напряжения деградации сверхпроводника.

Выводы

Оценены электрические и механические свойства контактов внахлест ВТСП лент на основе GdBCO в оболочке из меди, изготовленных методом пайки с использованием припоев ПОС и сплав Розе. Размеры контактов 5 мм, ширина ленты 4 мм. Сопротивление контактов при температуре 77 К составляло 190 нОм в случае использования сплава Розе и 108 нОм — для припоя ПОС. Изучена зависимость сопротивления контактов от индукции внешнего магнитного поля. Показано, что сопротивление контактов при 77 К слабо увеличивается с ростом поля и переходит к насыщению в полях $B > 3$ Тл как в продольном, так и в поперечном поле.

Получены механические характеристики исходных лент и контактов при статической деформации при комнатной температуре, предел пропорциональности и предел прочности на разрыв. Для контактов с применением ПОС предел прочности более чем вдвое превышает тот же параметр для контакта, сделанного сплавом Розе. В последнем случае предел прочности на растяжение ниже, чем критическое напряжение деградации сверхпроводника.

Припой ПОС по электропроводности и по механическим свойствам является наиболее предпочтительным для создания низкоомных соединений ВТСП лент.

Литература

1. Kang S., Goyal. A, Gapud A.A., Martin P.M., Heatherly L., Thomson J.R., Christen D.K., List F.A., Paranthaman M., Lee D.F. High-performance high- T_c superconducting wires. Science, 2006, v. 311, pp. 1911 – 1914.
2. Selvamanickam V., Chen Y., Xiong X., Xie Y.Y., Reeves J.L., Zhang X., Qiao Y., Lenseth K.P., Schmidt R.M., Rar A., Hazelton D.W., Tekletsadik K. Recent progress in second-generation HTS conductor scale-up at SuperPower. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2007, v. 17, p. 3231 – 3234.
3. Lee S., Petrykin V., Molodyk A., Samoilenkov S., Kaul A., Vavilov A., Vysotsky V., Fetisov S. Development and production of second generation high T_c superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables. Supercond. Sci. Technol., 2014, v. 27, 044022.
4. Duckworth R.C., Zhang Y., Gouge M. J., Rey C.M., van der Laan D.C., Clickner C. Voltage distribution and

- mechanical strength in splice joints made from as-manufactured YBCO coated conductors. AIP Conf. Proc., 2010, 1219, p. 370 – 379.
5. Kato J.Y., Sakai N., Tajima S., Miyata S., Watanabe T., Yamada Y., Chikumoto N., Nakao K., Izumi T., Shiohara Y. Low resistance joint of the YBCO coated conductor. J. Phys. Conf Ser., 2006, v. 43, p. 166 – 169.
 6. Park D.K., Ahn M.C., Kim H.M., Lee H.G., Chang K.S., Lee S.J., Yang S.E., Ko T.K. Analysis of a joint method between superconducting YBCO coated conductor, IEEE Trans. Appl Supercond., 2007, v. 17, p. 3266 – 3269.
 7. Park Y., Lee M., Ann H., Choi Y.H., Lee H. A superconducting joint for GdBa₂Cu₃O_{7-δ} — coated conductors. NPG Asia Materials, 2014, v. 6, e98; doi: 10.1038/am.2014.18.
 8. Физические величины. Справочник. Под ред. И.С. Григорьева и Е.З.Мелихова. М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.
 9. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Под ред. М.П.Малкова. М.: Энергоатомиздат, 1985, 432 с.
 10. сайт компании SuperPower от 6 апреля 2015 г. <http://www.superpower-inc.com/>
- References**
1. Kang S., Goyal A., Gapud A.A., Martin P.M., Heatherly L., Thomson J.R., Christen D.K., List F.A., Paranthaman M., Lee D.F. High-performance high- T_c superconducting wires. Science, 2006, vol. 311, pp. 1911-1914.
 2. Selvamanickam V., Chen Y., Xiong X., Xie Y.Y., Reeves J.L., Zhang X., Qiao Y., Lenseth K.P., Schmidt R.M., Rar A., Hazelton D.W., Tekletsadik K. Recent progress in second-generation HTS conductor scale-up at SuperPower. IEEE Trans. Appl. Supercond., 2007, vol. 17, pp. 3231 – 3234.
 3. Lee S., Petrykin V., Molodyk A., Samoilenkov S., Kaul A., Vavilov A., Vysotsky V., Fetisov S. Development and production of second generation high T_c superconducting tapes at SuperOx and first tests of model cables. Supercond. Sci. Technol., 2014, vol. 27, p. 044022.
 4. Duckworth R.C., Zhang Y., Gouge M. J., Rey C.M., van der Laan D.C., Clickner C. Voltage distribution and mechanical strength in splice joints made from as-manufactured YBCO coated conductors. AIP Conf. Proc., 2010, 1219, p. 370 – 379.
 5. Kato J.Y., Sakai N., Tajima S., Miyata S., Watanabe T., Yamada Y., Chikumoto N., Nakao K., Izumi T., Shiohara Y. Low resistance joint of the YBCO coated conductor. J. Phys. Conf Ser., 2006, vol. 43, pp. 166 – 169.
 6. Park D.K., Ahn M.C., Kim H.M., Lee H.G., Chang K.S., Lee S.J., Yang S.E., Ko T.K., Analysis of a joint method between superconducting YBCO coated conductor, IEEE Trans. Appl Supercond., 2007, v. 17, pp. 3266 – 3269.
 7. Park Y., Lee M., Ann H., Choi Y.H., Lee H. A superconducting joint for GdBa₂Cu₃O_{7-δ} — coated conductors. NPG Asia Materials, 2014, vol. 6, e98; doi: 10.1038/am.2014.18.
 8. Grigor'ev I.S. and Melikhov E.Z. *Fizicheskie velichiny. Spravochnik* [Physical values. Handbook]. Energoatomizdat Publ., 1991, 446 p.
 9. Malkov M.P. *Spravochnik po fiziko-tekhnichiskim osnovam kriogeniki* [Handbook of physical and technical fundamentals of cryogenics]. Energoatomizdat Publ., 1985, 238 p.
 10. Site of the SuperPower company on April 6, 2015. <http://www.superpower-inc.com/>

Статья поступила в редакцию 1.07.2015 г.

Троицкий Алексей Владимирович — Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН (г. Москва, 119991 ул. Вавилова 38), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физики низких температур, сверхпроводимости, радиационных дефектов. E-mail: at@kapella.gpi.ru.

Антонова Ландыш Халяфовна — Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН (г. Москва, 119991 ул. Вавилова 38), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области физики полупроводников, сверхпроводимости, радиационных дефектов. E-mail: lraa@kapella.gpi.ru.

Михайлова Галина Николаевна — Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН (г. Москва, 119991 ул. Вавилова 38), профессор, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области сверхпроводимости, физики низких температур, взаимодействия лазерного излучения с полупроводниками. E-mail: galina@kapella.gpi.ru.

Михайлов Борис Петрович — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва, 119991, Ленинский пр., 49), доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, специалист в области низких температур. E-mail: btix@imet.ac.ru.

Провирнин Дмитрий Викторович — Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (г. Москва, 119991, Ленинский пр., 49), кандидат технических наук, специалист в области механических характеристик и усталостных свойств материалов. E-mail: imetran@yandex.ru.

Маркелов Антон Викторович — ООО “СуперОкс-Инновации” (г. Москва, 117246 Научный проезд, д. 20), кандидат химических наук, ведущий исследователь, специалист в химии и технологии, высокотемпературных сверхпроводников, химическом осаждении из газовой фазы пленок неорганических материалов E-mail: a.markelov@superox.ru.

Самойленков Сергей Владимирович — ЗАО “СуперОкс” (г. Москва, 117246 Научный проезд, д. 20), кандидат химических наук, специалист в области синтеза сверхпроводников. E-mail: ssv@superox.ru.

Молодык Александр Александрович — ООО “СуперОкс-Инновации” (г. Москва, 117246 Научный проезд, д. 20), кандидат химических наук, технический директор, специалист в химии и технологии высокотемпературных сверхпроводников, химическом осаждении из газовой фазы пленок неорганических материалов. E-mail: a.molodyk@superox.ru.

Low-resistance soldered connections of $GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 2G tapes. The behavior in magnetic fields and mechanical properties

**A. V. Troitskii, L. Kh. Antonova, G. N. Mikhailova, B. P. Mikhailov,
D. V. Prosvirnin, A. V. Markelov, A. A. Molodyk, S. V. Samoilenkov**

The electrical properties of the joints of HTS 2G tapes were examined in an external magnetic fields up to 5 T at $T = 77$ K. A 50 % Bi – 32 % Pb – 18 % Sn (Rose alloy) and a 60 % Sn – 40 % Pb solders were used for the connection fabrication. The results obtained show that the contact resistance at $T = 77$ K in the case of SnPb solder was approximately twice lower than in the case of the Rose alloy. The dependence of the joint magnetic resistance is weak, it is not dependent on the relative orientation of the tape and the magnetic field, and it is saturated at about $B = 3$ T for all soldered connections. The mechanical tensile strength of the initial tapes and connections were measured at room temperature. A SnPb connection tensile strength is more than double higher than the same parameter for the joints made by Rose alloy. In the latter case, the tensile strength is lower than the critical tension of superconductor degradation.

Key words: HTS tapes, solders, magnetic field, the contact resistance, mechanical properties.

Troitskii Alexey — Prokhorov General Physics Institute of RAS (Moscow, 119991, Vavilov Str. 38), Ph. D., senior researcher, specialist in the field of low temperature physics, superconductivity, radiation defects. E-mail: at@kapella.gpi.ru.

Antonova Landysh — Prokhorov General Physics Institute of RAS (Moscow, 119991, Vavilov Str.38), Ph. D., senior researcher, specialist in the field of semiconductor physics, superconductivity, radiation defects. E-mail: lpaa@kapella.gpi.ru.

Mikhailova Galina — Prokhorov General Physics Institute of RAS (Moscow, 119991, Vavilov Str.38), D. Sci., leading researcher, specialist in the field of superconductivity, low temperature physics, laser interaction with semiconductors. E-mail: galina@kapella.gpi.ru.

Mikhailov Boris — Institution of Russian Academy of Sciences A.A.Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science RAS (Moscow, 119991, Leninsky pr., 49), D. Sci., leading researcher, specialist in low temperatures. E-mail: bmix@imet.ac.ru.

Prosvirnin Dmitry — *Institution of Russian Academy of Sciences A.A.Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science RAS (Moscow, 119991, Leninsky pr., 49), Ph. D., specialist in mechanical characteristics and fatigue properties of materials. E-mail: imetran@yandex.ru.*

Markelov Anton — *“SuperOx – Innovacii” (Moscow, 117246, Nauchnyi proezd, 20/2), Ph. D., leading researcher, specialist in chemistry and technology, high-temperature superconductors, chemical vapor deposition films of inorganic materials. E-mail: a.markelov@superox.ru.*

Samoylenkov Sergey — *“SuperOx Company” (Moscow, 117246, Nauchnyi proezd, 20/2), Ph. D., specialist in the field of synthesis of superconductors. E-mail: info@superox.ru.*

Molodyk Alexander — *“SuperOx – Innovacii” (Moscow, 117246, Nauchnyi proezd, 20/2), Ph. D., technical director, specialist in chemistry and technology of high-temperature superconductors, chemical vapor deposition films of inorganic materials. E-mail: a.molodyk@superox.ru.*