

УДК 538.91; 538.95; 538.945

PACS: 74.00

EDN: ESSRYZ



Исследование воздействия импульсной плазмы на наноструктурированные YBCO материалы

С. Х. Гаджимагомедов, А. Э. Рабаданова, М. Х. Рабаданов, М. Х. Гаджиев,
 В. С. Курбанисмаилов, Г. Б. Рагимханов, С. А. Майоров, А. А. Амирова,
 Н. А. Демиров, Р. М. Эмиров, Ш. П. Фараджев

Изготовлена наноструктурированная керамика состава YBCO с заданной плотностью и оптимально насыщенная кислородом. Изучено влияние плазменной обработки в течение ~60 сек на структуру и свойства поверхности мишени YBCO, расположенной на расстоянии 20 мм от среза сопла плазмотрона. Определены тепловые потоки, передаваемые плазмой при различных значениях силы тока, расхода газа и расстояния от среза сопла. Представлены результаты исследований структуры и свойств образца до и после воздействия. Установлено, что начало перехода в сверхпроводящее состояние ($T_{с,нач}$) для образцов, до и после воздействия плазмы, осталось неизменной и составляет ~91 К.

Ключевые слова: YBCO, сверхпроводник, плазменная обработка, трансформация.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-27-32

Введение

Перспектива использования высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) состава YBCO в системах энергоснабжения, и даже транспортных средствах, становится все более очевидной. В частности, объемные сверхпроводники YBCO все чаще используются при создании магнитных подшипников [1], левитирующих систем [2], и двигателей [3] и др. Для практического применения необходимо

изготовление сверхпроводников с заданной геометрией, используя методы механической обработки [4], 3D-печать [5] и плазменные технологии [6, 7]. Последние наиболее эффективны для создания градиентных керамик, имеющих изменяющиеся свойства в пределах одного образца [8]. Известно [6], что плазменная обработка образцов ВТСП приводит к аморфизации поверхности, что обеспечивает эффективную защиту их свойств от деградации со временем.

Гаджимагомедов Султанмахмед Ханахмедович¹, ст. пред., с.н.с., к.ф.-м.н.

Рабаданова Аида Энверовна¹, преп. м.н.с.

Рабаданов Муртазали Хулатаевич¹, профессор, д.ф.-м.н.

Гаджиев Махач Хайрудинович², зав. лаб., к.ф.-м.н.

Курбанисмаилов Вали Сулейманович¹, профессор, д.ф.-м.н.

Рагимханов Гаджимирза Балагланович¹, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: gb-r@mail.ru

Майоров Сергей Алексеевич², в.н.с., д.ф.-м.н.

Демиров Назир Арабханович², вед. инженер.

Амирова Анисе Александровна³, вед. инженер.

Эмиров Руслан Мурадович¹, м.н.с.

Фараджев Шамиль Пиралиевич¹, вед. инженер, м.н.с.

¹ Дагестанский государственный университет.

Россия, 367001, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, 43а.

² Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

³ Институт физики ДФИЦ РАН.

Россия, 367015, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 94.

Статья поступила в редакцию 28.11.2022

После доработки 14.12.2022

Принята к публикации 22.12.2022

© Гаджимагомедов С. Х., Рабаданова А. Э., Рабаданов М. Х., Гаджиев М. Х., Курбанисмаилов В. С., Рагимханов Г. Б., Майоров С. А., Демиров Н. А., Амирова А. А., Эмиров Р. М., Фараджев Ш. П., 2023

С целью установления влияния плазменной обработки, в настоящей работе поверхность наноструктурированной мишени YBCO подвергалась воздействию потока мощной импульсной плазмы. Ниже представлены результаты исследований структуры и свойств образца до и после воздействия.

Методика эксперимента

В качестве образцов использовались наноструктурированные мишени на основе YBCO, полученных по технологии [9, 10]. Эта технология обеспечивает изготовление керамики (в один этап) с соответствующей плотностью и дисперсностью частиц, содержащих преимущественно фазу, оптимально насыщенную кислородом.

Дифракционный анализ и исследования фазового состава образцов проводились на дифрактометре PANalytical Empyrean series 2 и сканирующем электронном микроскопе ASPEX Express на базе EDX детектора Omega Max, соответственно. Спектры комбинационного рассеяния образцов исследовались на атомно-силовом микроскопе Ntegra Spectra (NT-MDT) (режим комбинационного рассеяния). Измерения электросопротивления образцов проводились на автоматизированной установке стандартным 4-х зондовым методом с использованием цифрового мультиметра Keithley 2002.

Источником низкотемпературной высокоэнтальпийной плазмы служил плазматрон с расширяющимся каналом выходного электрода [11]. В экспериментах воздействие на образец плазменной струей в течении ~1 мин с осуществлялось на расстоянии 2 см от среза сопла плазматрона.

Результаты и обсуждение

Для определения параметров плазмы (T_e , n_e , q) на первоначальном этапе проводились калориметрические и спектральные измерения плазменного потока. На основе калориметрических измерений были определены тепловые потоки, передаваемые плазмой при различных значениях силы тока, расхода газа и расстояния от среза сопла плазматрона. При изменении мощности плазматрона в диапазоне $P = 5 \div 10$ кВт в аргоне и расстояния от среза сопла 1÷3 см, плазменная струя при

нормальном падении на калориметр обеспечивает удельные тепловые потоки в пределах $20 \div 1000$ Вт/см². Например, для тока дуги 250 А при расходе газа 3 г/с и расстоянии до образца 2 см, удельный тепловой поток равен $q = 54$ Вт/см². При этих условиях образец состава YBCO подвергался в течение ~1 мин воздействию потока плазмы, создаваемого плазматроном при токе 250 А и расходе газа 3 г/с. Регистрация свечения плазмы и нагретых ею образцов высокоскоростной видеокамерой дает информацию об изменении яркостной температуры поверхности образца с течением времени.

Для обеспечения работы видеокамеры в режиме «нормальных» освещенностей и в калибровочных целях, использовались также паспортизированные нейтральные светофильтры. На рис. 1 приведены примеры зарегистрированных видов свечения образца и результат их программного преобразования в поле температур с использованием калибровки яркости по эталонному источнику излучения (вольфрамовая лампа с яркостной температурой в 2400 К) в различные моменты времени. Анализ результатов скоростной съемки и термограмм показывает, что за короткое время (4÷5 секунд) температура в эпицентре плазменной струи достигает ~1600 К, образец вне эпицентра нагревается за счет теплопроводности до 1400 К. Завышенная температура по краям образца и свечение снизу от него связаны с отражением свечения плазмы от поверхности медного калориметра.

Результаты исследования структуры керамики до и после воздействия приведены на рис. 2. Для уточнения структуры использовался метод Ритвельда. Средний размер кристаллитов определялся по формуле Шеррера. В основном, структура орторомбическая – сверхпроводящая. Как видно, до воздействия плазмой керамика состоит, в основном, из фазы $YBa_2Cu_3O_{6,9}$, оксида меди (CuO) и Y_2BaCuO_5 . Доля сверхпроводящей фазы (с индексом при кислороде ~ 6,9) составляет ~ 90 %, фаз CuO и Y_2BaCuO_5 – примерно 8 и 2 % соответственно, а остальные оксиды «материнских» элементов, вероятно, в рентгеноаморфном состоянии. Равномерное распределение в образцах керамики таких частиц в виде оксидов, дает преимущество в решении задачи повышения значения критического тока путем наноструктурирования [9].

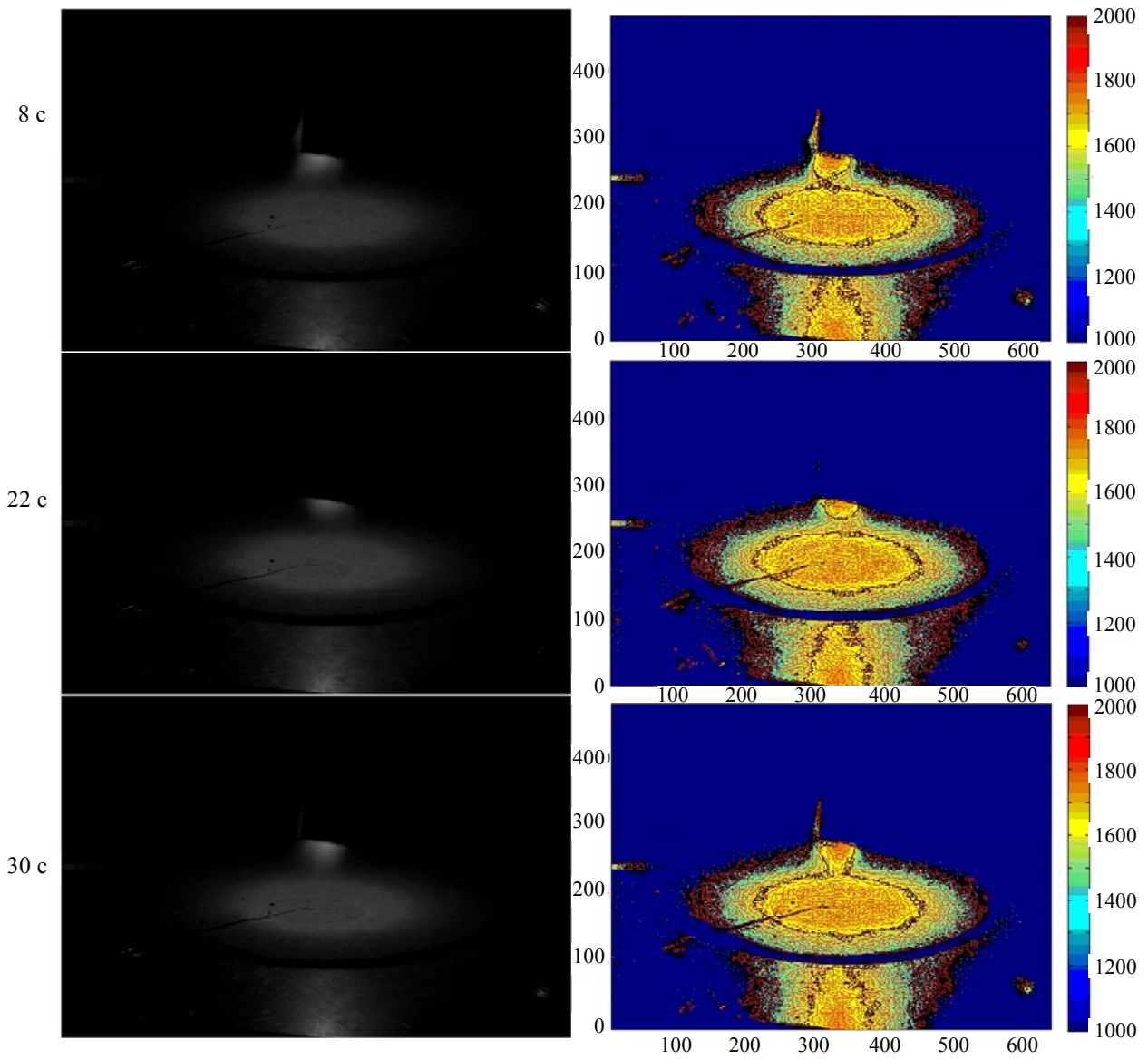


Рис. 1. Свечение образца в разные моменты времени и его преобразование в поле температур

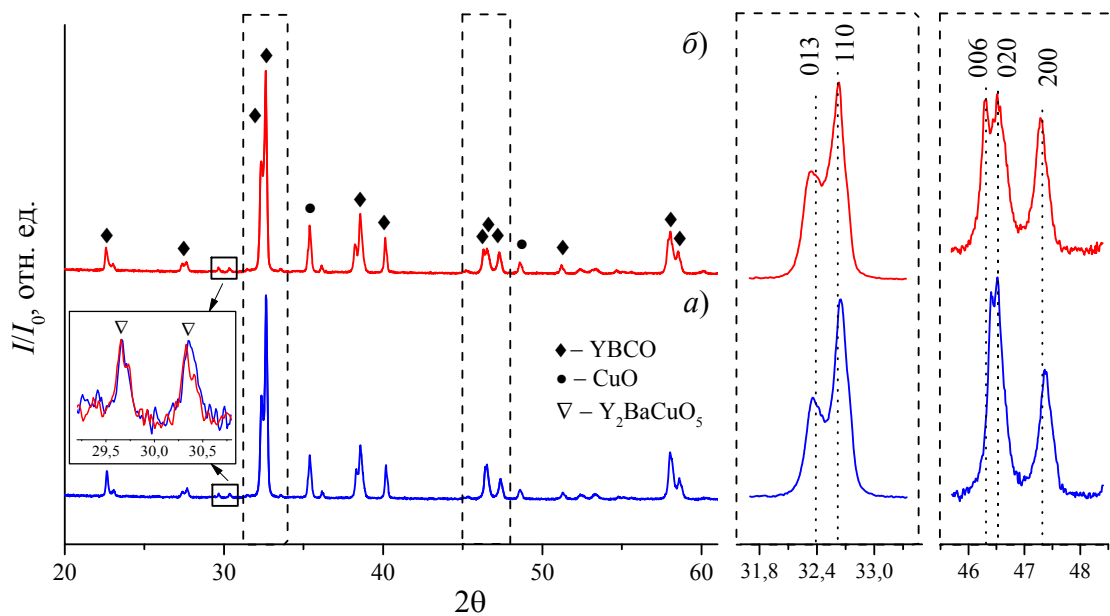


Рис. 2. Дифрактограммы для образца керамики YBCO до – а) и после – б) воздействия

Согласно данным дифракционного анализа, в керамике наблюдается формирование сверхпроводящей структуры с преимущественной ориентацией вдоль оси c в перпендикулярном к поверхности мишени направлении, на что указывают ярко выраженные пики от серии плоскостей $(00l)$. Такая текстура является результатом одноосного сжатия при прессовании порошка в гранулу и последующего высокотемпературного спекания.

После обработки поверхности плазмой, наблюдается незначительное (на $\sim 8\%$) снижение не только доли сверхпроводящей фазы, а также индекса по кислороду с $\sim 6,9$ до $\sim 6,7$ (рис. 2). Согласно результатам уточнения структуры, доля сверхпроводящей фазы с индексом при кислороде $\sim 6,7$ составляет $\sim 82\%$, фаз CuO и Y_2BaCuO_5 – примерно 16 и 2% соответственно. Других фаз из оксидов «материнских» элементов не обнаружено. Плазменная обработка привела к незначительному увеличению (от ~ 72 до ~ 74 нм) среднего размера кристаллитов. После воздействия плазмой, преимущественная ориентация зерен в направлении $(00l)$ сохраняется, хотя на дифрактограммах наблюдаются изменения интенсивности пиков. Воздействие плазмой привело к небольшому (до $\sim 10\%$) увеличению плотности керамики до величины $\sim 3,8$ г/см³ за счет уплотнения зерен на поверхности образ-

ца и аморфизации поверхности, а также среднего размера кристаллитов до величины ~ 74 нм при исходном значении размера кристаллитов ~ 72 нм.

Результаты исследования температурной зависимости электросопротивления $\rho = f(T)$ наноструктурированных мишеней YBCO до и после воздействия плазмой представлены на рис. 3. Начало перехода в сверхпроводящее состояние ($T_{c, \text{нач}}$), до и после воздействия плазмой, осталось неизменным и составляет ~ 91 К. При этом характер зависимости $\rho = f(T)$ изменился с металлического на полупроводниковый. Ширина перехода в сверхпроводящее состояние (ΔT_c) до воздействия плазмой составляла ~ 6 К, а после – переход растянут более чем на 25 К.

До обработки плазмой у керамики наблюдался металлический характер $\rho = f(T)$, связанный, в основном, с упорядочением кислорода в структуре YBCO. Высокие (почти в два раза) значения электросопротивления при ~ 300 К для обработанной керамики, по сравнению с исходным образцом, так же связаны с нарушением кислородной стехиометрии. После воздействия температурный коэффициент сопротивления (TKR) в интервале от ~ 300 до ~ 150 К равен $0,0018$ К⁻¹, а в интервале от 150 до 95 К он увеличился более чем в 10 раз.

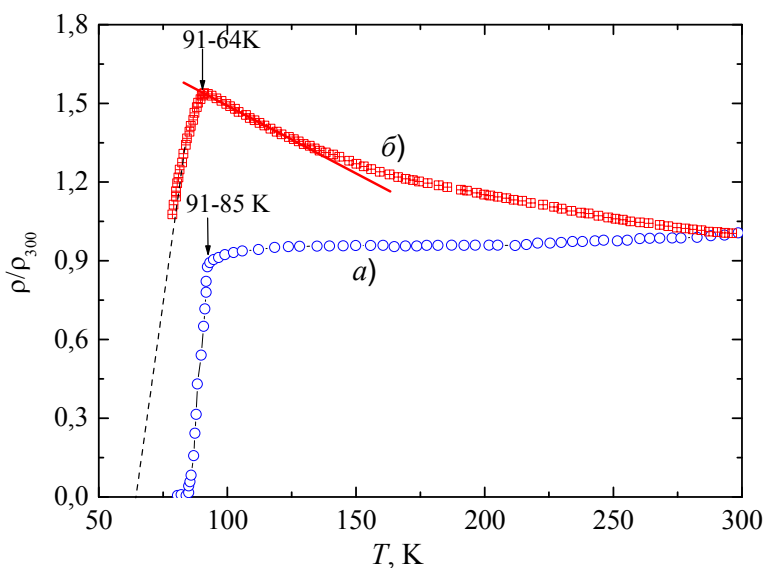


Рис. 3. Температурные зависимости электросопротивления мишеней YBCO: до – а) и после – б) воздействия импульсной плазмой

Заключение

В настоящей работе изучено влияние плазменной обработки в течение одной мину-

ты на структуру и свойства поверхности мишени YBCO, расположенной на расстоянии 2 см от среза сопла плазматрона. Определены тепловые потоки, передаваемые плазмой при

различных значениях силы тока, расхода газа и расстояния от среза сопла.

Показано, что преимущественная ориентация в направлении (00 l) в сверхпроводящих зернах сохраняется после обработки. При этом характер зависимости ρ – T изменилась с металлической на полупроводниковый.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-08-00092а), а также частично проекта РФФИ № 20-08-01069а (проведение детальных исследований параметров плазмы и изучения вопросов уточнения структур материала) и в рамках Государственных заданий FZNZ-2020-0002 (проведение измерений структуры).

ЛИТЕРАТУРА

1. Moon F. C., Chang P. Z. / Applied Physics Letters. 1990. Vol. 56. № 4. P. 397–399.
2. Hull J. R., Hanany S., Matsumura T., Johnson B., Jones T. / Superconductor Science and Technology. 2004. Vol. 18. № 2. P. S1–S5.

3. Kenfaui D., Sibeud P. F., Louradour E., Chaud X., Noudem J. G. / Advanced Functional Materials. 2014. Vol. 24. № 25. P. 3996–4004.

4. Noudem J. G., Meslin S., Horvath D. et al. / Journal of the American Ceramic Society. 2007. Vol. 90. № 9. P. 2784–2790.

5. Zhang B., Zhang Q., He P., Ma Y., Shen L., Zhang X., Zhou Y. / Advanced Functional Materials. 2021. Vol. 31. № 22. P. 2100680.

6. Позигун С. А., Пан В. М., Алексеев В. А. и др. / Усп. Физ. Мет. 2004. Vol. 5. P. 167–218.

7. Гаджиев М. Х., Гаджимагомедов С. Х., Демиров Н. А., Рагимханов Г. Б. и др. / Письма в Журнал технической физики. 2017. Т. 43. № 13. С. 26–33.

8. Гаджимагомедов С. Х., Пресняков М. Ю., Муслимов А. Э., Гаджиев М. Х. и др. / Кристаллография. 2022. Т. 67. № 6. С. 999–1003.

9. Gadzhimagomedov S. K., Palchaev D. K., Rabadanov M. Kh et al. / Technical Physics Letters. 2016. Vol. 42. № 1. P. 4–7.

10. Шабанов Н. С., Гаджимагомедов С. Х., Палчаев Д. К., Рабаданов М. Х., Мурлиева Ж. Х., Палчаев Н. А. Способ получения высокотемпературной сверхпроводящей керамики. Патент RU № 2601073С1, 02.06.2016. Бюл. № 30 от 27.10.2016.

11. Гаджиев М. Х., Исакаев Э. Х., Тюфтяев А. С., Юсупов Д. И. / Письма в Журнал технической физики. 2016. Т. 42. № 2. С. 44–49.

PACS: 52.80.Mg

Investigation of the impact of pulsed plasma on nanostructured YBCO materials

S. Kh. Gadzhimagomedov¹, A. E. Rabadanova¹, M. Kh. Rabadanov¹, M. Kh. Gadzhiev², V. S. Kurbanismailov¹, G. B. Ragimkhanov¹, S. A. Mayorov², A. A. Amirova³, N. A. Demirov², R. M. Emirov¹ and Sh. P. Faradzhev¹

¹ Dagestan State University, Makhachkala
43-a Gadzhiyev st., Makhachkala, the Republic of Dagestan, 367000, Russia
E-mail: gb-r@mail.ru

² Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

³ Institute of Physics, Dagestan Federal Research Center RAS
94 M. Yaragsky st., Makhachkala, 367015, Russia

Received 28.11.2022; revised 14.12.2022; accepted 22.12.2022

Nanostructured YBCO ceramics with a given density and optimally saturated with oxygen were fabricated. The effect of plasma treatment for ~60 s on the structure and properties of the surface of a YBCO target located at a distance of 20 mm from the plasma torch nozzle exit has been studied. The heat fluxes transferred by the plasma are determined for various values of

the current strength, gas flow rate, and distance from the nozzle exit. The results of studies of the structure and properties of the sample before and after exposure are presented. It has been found that the onset of the transition to the superconducting state ($T_{c, b}$) for the samples, before and after exposure to the plasma, remains unchanged and amounts to ~ 91 K.

Keywords: nitrogen oxides, diffuse discharge, gas dynamics, plasma chemistry.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-27-32

REFERENCES

1. Moon F. C. and Chang P. Z., Applied Physics Letters **56** (4), 397–399 (1990).
2. Hull J. R., Hanany S., Matsumura T., Johnson B. and Jones T., Superconductor Science and Technology **18** (2), S1–S5 (2004).
3. Kenfaui D., Sibeud P. F., Lourador E., Chaud X. and Noudem J. G., Advanced Functional Materials **24** (25), 3996–4004 (2014).
4. Noudem J. G., Meslin S., Horvath D. et al., Journal of the American Ceramic Society **90** (9), 2784–2790 (2007).
5. Zhang B., Zhang Q., He P., Ma Y., Shen L., Zhang X. and Zhou Y., Advanced Functional Materials **31** (22), 2100680 (2021).
6. Pozigun S. A., Pan V. M., Alekseev V. A. et al., Usp. Fiz. Met. **5**, 167–218 (2004).
7. Gadzhiev M. Kh., Gadzhimagomedov S. Kh., Demirov N. A., Ragimkhanov G. B. et al., Letters to the Journal of Technical Physics **43** (13), 26–33 (2017).
8. Gadzhimagomedov S. Kh., Presnyakov M. Yu., Muslimov A. E., Gadzhiev M. Kh. et al., Crystallography **67** (6), 999–1003 (2022).
9. Gadzhimagomedov S. K., Palchaev D. K., Rabadanov M. Kh. et al., Technical Physics Letters **42** (1), 4–7 (2016).
10. Shabanov N. S., Gadzhimagomedov S. Kh., Palchaev D. K., Rabadanov M. Kh., Murlieva Zh. Kh. and Palchaev N. A., Method for obtaining high-temperature superconducting ceramics. Patent RU № 2601073C1, 06/02/2016, Bull. No. 30 dated October 27, 2016.
11. Gadzhiev M. Kh., Isakaev E. Kh., Tyuftyaev A. S. and Yusupov D. I., Technical Physics Letters **42** (2), 44–49 (2016).