

УДК 621.039.633

## ДОСТАВКА ЛЕВИТИРУЮЩЕЙ КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ С ВТСП-ПОКРЫТИЕМ

И. В. Александрова, Е. Р. Корешева, Е. Л. Кошелев,  
А. И. Никитенко, Т. П. Тимашева

*Исследуются магнитолевитационные технологии как инновационная основа для создания бесконтактных систем доставки криогенных топливных мишеней в лазерный фокус установки ИТС или будущего реактора. Необходимым элементом таких систем является специальный носитель мишени, изготовленный из высокотемпературных сверхпроводников с высоким пиннингом вихрей. В работе экспериментально показано, что носитель в виде внешнего ВТСП-покрытия мишени позволяет полностью исключить механическое трение при ускорении мишени за счёт её левитации в градиентном магнитном поле. Обсуждаются перспективы дальнейшего развития этого направления за счёт создания наноструктурных плёнок и покрытий из ВТСП.*

**Ключевые слова:** инерциальный термоядерный синтез (ИТС), криогенная топливная мишень (КТМ), высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП), доставка КТМ с помощью левитации.

*Введение.* В работе изучается вопрос о создании бесконтактных систем доставки КТМ в лазерный фокус установки ИТС, необходимость разработки которых детально обсуждается в работе [1]. Одной из причин этих разработок является нагрев КТМ за счёт трения носителя в процессе ускорения. Это связано с тем, что КТМ должна иметь в момент облучения лазером температуру не выше 18.3 К, а её перегрев сверх допустимого значения ( $\sim 100$  мК) неизбежно приведёт к потере качества топливного слоя [2]. Кроме того, вследствие трения эффективность конверсии электромагнитной энергии ускоряющего КТМ импульса в кинетическую энергию относительно мала. Чтобы избежать последствий перегрева КТМ и повысить эффективность процесса ускорения, в

ФИАН успешно развиваются исследования по созданию магнитолевитационных (МАГЛЕВ) систем доставки КТМ с помощью левитирующего носителя, изготовленного из ВТСП материалов с высоким пиннингом вихрей (т. н. ВТСП-МАГЛЕВ ускорители) [1]. Рассматривается ВТСП-носитель в двух модификациях (см. рис. 1): (а) ВТСП-капсула или (б) внешнее ВТСП-покрытие для КТМ. Ранее на основе расчетов и экспериментов была доказана возможность реализации первого подхода (рис. 2), а именно, использование носителя, изготовленного из ВТСП-лент второго поколения типа СуперОкс J-PI-12-20Ag-20Cu [1, 3].

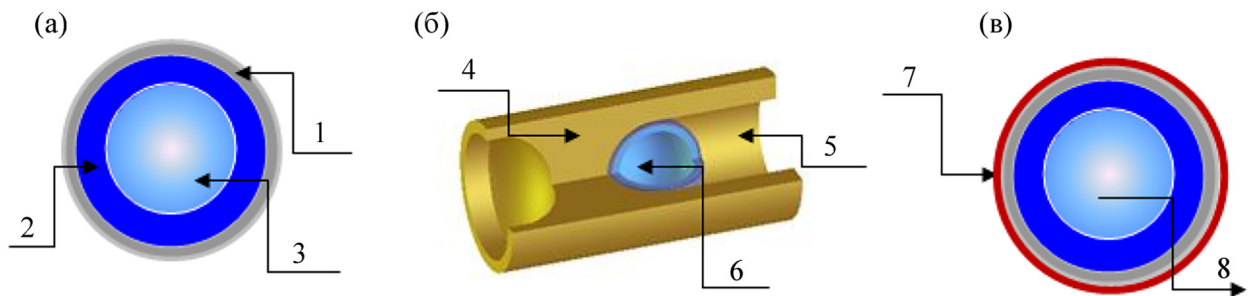


Рис. 1: Основные элементы КТМ и ВТСП-носителя: (а) КТМ (1 – оболочка, 2 – криогенный слой, 3 – топливный пар, масса реакторной КТМ  $m \sim 4.5$  мг); (б) ВТСП-носитель в виде капсулы (4 – ВТСП-корпус, 5 – гнездо для фиксации КТМ, 6 – КТМ); (в) ВТСП-носитель в виде ВТСП-покрытия (7 – ВТСП-покрытие, 8 – КТМ).

Данная работа продолжает исследования [4] по практической реализации второго подхода: ВТСП-носитель в виде внешнего покрытия КТМ из ВТСП керамики на основе  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . Отметим, что в основе обоих подходов лежит явление квантовой левитации ВТСП в градиентном магнитном поле [5–7].

*Выбор сверхпроводящих материалов.* Суть квантовой левитации состоит в том, что благодаря использованию физических свойств сверхпроводников, их возможно не просто удерживать в состоянии устойчивой левитации, но и заставить двигаться вдоль направляющих магнитных рельсов. Сила  $F$ , приводящая в движение сверхпроводник, определяется формулой [6]:

$$F = \frac{\chi}{2\mu_0} V_S \frac{dB_x^2}{dx}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\chi$  – магнитная восприимчивость,  $V_S$  – объем сверхпроводника,  $x$  – направление движения,  $B_x$  – индукция магнитного поля. Поскольку для сверхпроводников  $\chi < 0$ , то эта сила направлена против градиента поля

$dB_x/dx$ , и, следовательно, сверхпроводники выталкиваются из области более сильного магнитного поля.

В общем случае сверхпроводники подразделяются на две группы по значениям величин, выше которых их сверхпроводимость разрушается: это критическая температура ( $T_C$ ) и критическое магнитное поле ( $B_C$ ). Сверхпроводники I рода (Тип-I) имеют  $T_C < 10$  К, т. е. ниже требуемой температуры доставки КТМ (18.3 К), а значит они не применимы для создания левитирующего носителя. Кроме того, обычно Тип-I имеет значения  $B_C$  слишком низкие для практических приложений. Поэтому нами используются ВТСП, являющиеся сверхпроводниками второго II рода (Тип-II), для которых характерны два значения критического поля:  $B_{C1}$  и  $B_{C2}$ . Ниже  $B_{C1}$  Тип-II ведет себя аналогично Типу-I. Когда приложенное магнитное поле находится между  $B_{C1}$  и  $B_{C2}$ , оно частично проникает в ВТСП в виде квантованных линий магнитного потока (или вихрей), и ВТСП находится в смешанном состоянии. Такие материалы могут подвергаться гораздо более сильным магнитным полям и оставаться сверхпроводящими. Разработаны ВТСП с  $T_C$  в диапазоне 90–120 К, что позволяет поддерживать их в сверхпроводящем состоянии с помощью жидкого азота (77 К).

Учтём также, что вихрь – это сверхпроводящий ток, циркулирующий вокруг несверхпроводящего ядра [7]. Из-за пространственных несовершенств (или дефектов), которые всегда имеются в реальном ВТСП, происходит закрепление вихревой структуры на дефектах решетки (т. н. пиннинг вихревых токов), и любое пространственное смещение ВТСП в направлении  $dB_x/dx \neq 0$  приводит, согласно закону Ленца, к возникновению магнитного поля, препятствующего этому смещению. ВТСП остается локализованным в своем исходном состоянии, в том числе и при движении, если это движение осуществляется за счет специальной конструкции магнитного рельса [5] (напр., в виде N-S-N трека, см. рис. 2), при которой магнитное поле обладает определенной симметрией относительно траектории движения ВТСП.

При этом свободно перемещаться можно только в одном направлении – вдоль линий симметрии магнитного поля, где  $dB_x/dx = 0$  (см. формулу (1)), а вот в поперечном сечении рельса должен существовать достаточно сильный градиент или “магнитная стенка”, чтобы препятствовать смещению ВТСП в этом направлении. Конфигурация постоянных магнитов в треке по схеме в N-S-N или S-N-S [5] решает эту проблему и лежит в основе создания магнитных направляющих систем (т. н. PMG-системы) как линейных, так и замкнутых – кольцевых, овальных или произвольной формы.

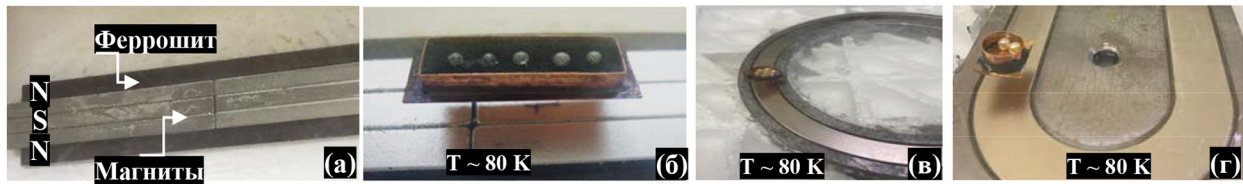


Рис. 2: Построение  $N-S-N$ -трека: (а) принцип расположения элементов в треке; (б) левитация ВТСП-носителя (прямоугольник на подложке,  $m = 1.25$  г) вдоль линейного трека с 5 сферическими оболочками,  $m \sim 0.6$  мг каждая; (в) левитация ВТСП-носителя (цилиндр на подложке,  $m = 0.4$  г) вдоль кругового трека с 7-ю стеклянными шариками,  $m \sim 34$  мг каждый); (г) левитация ВТСП-носителя вдоль овального трека с 2 аналогичными шариками.

*Подготовка экспериментов и обсуждение полученных результатов.* Из сказанного выше очевидно, что основное магнитомеханическое явление, ответственное за левитацию, является результатом закрепления магнитного потока, присущего взаимодействию между магнитным рельсом и ВТСП, которое обеспечивает достаточную силу левитации, а также контроль движения и его стабильность (см. рис. 3).

В экспериментах в качестве ВТСП использовалась керамика на основе  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (Y123) (производство ФИАН [8],  $\rho = 4.3$  г/см<sup>3</sup>) с температурой сверхпроводящего перехода  $T_C = 91$  К и значением верхнего критического поля  $B_{C2} > 45$  Тл. Исходная Y123 таблетка изготавливалась методом твердофазных реакций. Приготовленную таблетку затем разламывали, растирали и отжигали в атмосфере кислорода при 440 °С [8]. Затем полученный порошок проверяли на левитирующие свойства в магнитном поле при  $B = 0.1 - 0.4$  Тл и  $T = 80$  К. В случае положительных результатов порошок смешивался с композитом из вязкого полимера. Размер встроенных микрочастиц составлял от 10 до 50 мкм. Полученный композитный материал наносился тонким слоем на внешнюю поверхность полимерной (СН) оболочки. СН-оболочки производства ФИАН [9] с плотностью полимера  $\rho = 1.05$  г/см<sup>3</sup> имели диаметр  $\varnothing \sim 2$  мм, который соответствовал диаметру оболочек, предназначенных для исследования альтернативной схемы ударного зажигания топлива в КТМ [10]. Измерение параметров СН-оболочек проводилось на микроскопе ИМЦЛ-100х50А с точностью  $\pm 0.2$  мкм. Измерение веса оболочек было выполнено с помощью аналитических весов типа МХА 2/1-Sensor-Display (фирма Radwag), точность измерения  $\pm 0.1$  мкг; аналогично были измерены веса и других ВТСП-образцов (таблеток и порошков).

Цель работы – создать прототип исследуемого объекта в виде “СН-оболочка + Y123-слой” и изучить перспективы управления его положением с помощью магнитных полей различной конфигурации. Для осуществления подобного класса экспериментов в ФИАН разрабатываются различные направляющие из постоянных магнитов (PMG-системы) как линейного, так и замкнутого типа (см. рис. 2). Конкретно, для данного цикла исследований были созданы три PMG-системы со следующими параметрами (рис. 3):

– Круговая PMG (рис. 3(а), кадр 4): диск из NdFeB, OD = 15 мм и ID = 6 мм (здесь OD – внешний диаметр, ID – внутренний диаметр) толщина  $d = 5$  мм, плюс внутренняя вставка из феррошита с OD = 6 мм и  $d = 5$  мм; поле над PMG  $B_{\max} = 0.39$  Тл.

– Линейная PMG-1 (рис. 3(а), кадр 2): 2 стандартных магнита (феррит на основе SmCo, размеры  $20 \times 9 \times 5$  мм<sup>3</sup>) размещены на основании из феррошита,  $d = 0.5$  мм;  $B_{\max} = 0.4$  Тл.

– Линейная PMG-2 (рис. 3(в), кадры 1–5): 3 магнита ( $120 \times 8 \times 5$  мм<sup>3</sup>) размещены на основании из феррошита,  $d = 3$  мм. Средний магнит покрыт пластинкой феррошита ( $57 \times 8 \times 0.3$  мм<sup>3</sup>);  $B_{\max} = 0.42$  Тл.

Во всех случаях основание из магнитомягкого железа (феррошит) работает как полюсный наконечник, который направляет и концентрирует магнитный поток на рабочую поверхность.

Полученные результаты, демонстрирующие основные этапы подготовки прототипа “СН-оболочка + Y123-слой”, а также результаты экспериментов по изучению особенностей бесконтактного позиционирования и транспорта прототипа, представлены на рис. 3:

– Рис. 3(а) (кадры № 1–4): кадр № 1 – СН-оболочки до нанесения сверхпроводящего покрытия, кадр № 2 демонстрирует стабильную левитацию сверхпроводящей подложки (Y123 таблетка  $\varnothing = 16.4$  мм,  $d = 5.7$  мм,  $m \sim 6$  г) с лежащей на ней СН-оболочкой ( $\varnothing = 2$  мм,  $m \sim 0.6$  мг); кадр № 3 – СН-оболочка после нанесения Y123 покрытия, т. н. прототип “СН-оболочка + Y123-слой”; кадр № 4 демонстрирует стабильную левитацию прототипа “СН-оболочка + Y123-слой” над круговой PMG при  $T \sim 80$  К, или другими словами, бесконтактное позиционирование прототипа в заданной точке пространства. Это открывает новые возможности для сборки КТМ непрямого облучения, когда КТМ на подвесе помещается внутри небольшой полости (цилиндрический контейнер, сделанный из материалов с большой атомной массой), называемой хольраумом [1]. Бесконтактная фиксация КТМ с помощью левитации позволяет исключить влияние

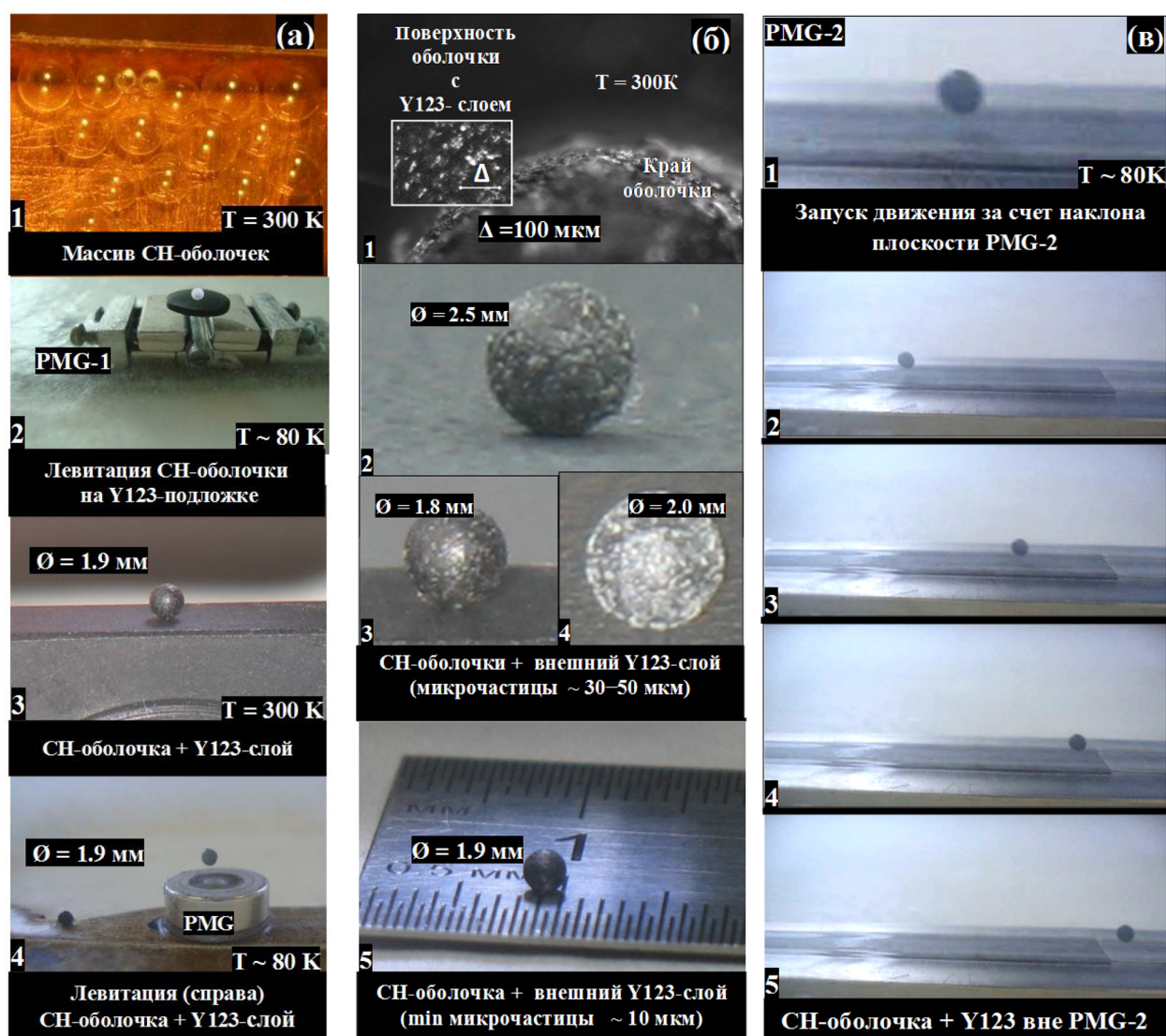


Рис. 3: Результаты модельных экспериментов: (а) кадр 1 – массив сферических СН-оболочек без покрытия, кадр 2 – левитация СН-оболочки, расположенной на Y123-подложке (имитация капсулы-носителя КТМ), кадр 3 – прототип исследуемого объекта “СН-оболочка + Y123-слой” при  $T = 300\text{ K}$ , 4 – бесконтактное, за счёт левитации, фиксирование прототипа в заданной точке пространства над круговой PMG при  $T \sim 80\text{ K}$  (показательно, что аналогичный вариант прототипа, расположенный слева вне PMG-системы, в состоянии левитации не переходит); (б) создание различных вариантов прототипа; (в) ускорение прототипа в линейной системе PMG-2 при  $T \sim 80\text{ K}$ .



подвеса на симметрию сжатия топлива в экспериментах по ИТС.

– Рис. 3(б) (кадры № 1–5): различные варианты прототипа с внешним Y123-слоем при различной концентрации микрочастиц сверхпроводящей керамики.

– Рис. 3(в) (кадры № 1–5): гравитационное ускорение прототипа в линейной системе РМГ-2 (начальный кадр № 1 дан с увеличением). При возрастании скорости прототипа его кинетическая энергия становится достаточной, чтобы преодолеть силу отталкивания со стороны “магнитной стенки” и выйти за пределы РМГ-2 (рис. 3(в), кадр № 5). В данном эксперименте скорость прототипа составила  $\sim 1$  м/с.

*Заключение.* В ФИАН разрабатываются ВТСП-МАГЛЕВ технологии на основе явления квантовой левитации ВТСП для создания перспективных систем бесконтактного позиционирования и транспорта КТМ и их доставки в фокус мощных лазерных установок или реактора ИТС. Важность этого направления определяется ещё и тем, что КТМ может содержать радиоактивное топливо, что накладывает дополнительные условия на безопасность транспорта КТМ.

В данной работе исследовалась возможность как бесконтактной фиксации, так и ускорения левитирующего носителя КТМ, выполненного в виде СН-сферы с внешним покрытием из Y123 керамики.

Создано несколько прототипов носителя в виде “СН-оболочка + Y123-слой”, три направляющих РМГ-системы различной конфигурации и проведена серия модельных экспериментов. Продемонстрирована стабильная фиксация прототипа, а также возможность его гравитационного ускорения вдоль линейного магнитного рельса. Y123-слой представляет собой композит из вязкого полимера со встроенными микрочастицами из сверхпроводящей керамики размером от 10 до 50 мкм. Преимуществом такого подхода является отсутствие механического трения, так как вопрос о разработке криогенных смазок при температурах  $T < 20$  К остаётся открытым.

Перспективы дальнейших исследований связаны с созданием сверхтонких покрытий с целью минимизировать вмешательство в исходный дизайн КТМ. Полученные результаты будут использованы в программе ФИАН по разработке систем бесконтактной доставки КТМ на основе ВТСП с улучшенными сверхпроводящими и структурными свойствами, а именно:

– Создание наноструктурных пленок и покрытий. В настоящее время это активно развивающееся направление в материаловедении, связанное со специальной обработкой поверхности для формирования слоёв с характерным размером кристаллитов от 1 нм до нескольких десятков нм. При этом считается, что твердая фаза из нанокристаллов, сво-

бодная от дислокаций, окружена тонким слоем аморфной фазы размером 1–2 нм. Благодаря особенностям строения наноматериалы обладают рядом уникальных свойств, в частности повышенной прочностью и твердостью [11]. Применение сверхтонких нанопокровов при производстве КТМ позволит значительно повысить механические и физические свойства оболочек как при комнатной, так и при криогенной температурах, а также снизить риски повреждения КТМ в процессе доставки.

– Параллельно, ведутся работы по синтезу нанопорошков из сверхпроводящей керамики; описание свойств керамик на их основе можно найти в работе [12].

– В дополнение к сказанному, отметим новое направление, связанное с созданием ВТСИ материалов с пористостью выше 50% [13]. Поры в таких ВТСИ обеспечивают заданное проникновение хладагента, эффективный отвод тепла и стабильное функционирование.

Работа выполнена в рамках Государственного Задания ФИАН АААА-А19-119083090043-0, а также при финансовой поддержке МАГАТЭ в рамках научного проекта № 24154.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] I. V. Aleksandrova, E. R. Koresheva, E. L. Koshelev, *High Power Lasers Sci. Eng.* **10**, e11 (2022). DOI: 10.1017/hpl.2022.1.
- [2] D. T. Goodin, N. B. Alexander, L. C. Brown, et al., *Nuclear Fusion* **44**(12), S254 (2004). DOI: 10.1088/0029-5515/44/12/S17.
- [3] И. В. Александрова, А. А. Акунец, П. И. Безотосный и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **43**(5), 15 (2016). DOI: 10.3103/s1068335616050031.
- [4] И. В. Александрова, А. А. Акунец, П. И. Безотосный и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **42**(11), 3 (2015). DOI: 10.3103/S106843561510019.
- [5] В. Л. Гинзбург, Е. А. Андрушин, *Сверхпроводимость*. 2-е издание (М., Альфа-М, 2006), 110 с.
- [6] Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц, *Электродинамика сплошных сред*. Т. 8 (М., Наука, 1982), 621 с.
- [7] А. А. Абрикосов, *УФН* **87**(9), 125 (1965). DOI: 10.1070/PU1966v008n05ABEN003031.
- [8] К. В. Мицен, О. М. Иваненко, *УФН* **187**(4), 431 (2017). DOI: 10.3367/UFNe.2016.12.038000.



- [9] Н. Г. Борисенко, В. С. Бушуев, А. И. Громов и др., Квантовая электроника **16**(9), 1895 (1989). DOI: <https://doi.org/10.1070/QE1989v019n09ABEH009124>.
- [10] W. L. Shang, R. Betti, S. X. Hu, et al., Phys. Rev. Lett. **119**, 195001-1-195001-5 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.195001.
- [11] M. A. Meyers, A. Mishra, D. J. Benson, Progress in Materials Science **51**(4), 427 (2006). DOI: 10.1016/j.pmatsci.2005.08.003.
- [12] С. Х. Гаджимагомедов, Д. К. Палчаев, Н. А. Палчаев и др., Кристаллография **64**(3), 442 (2019). DOI: 10.1134/S0023476119030068.
- [13] D. M. Gokhfeld, M. R. Koblishka, A. Koblishka-Veneva, The Physics of Metals and Metallography **121**(10), 936 (2020). DOI: 10.1134/S0031918X20100051.

Поступила в редакцию 31 марта 2023 г.

После доработки 8 апреля 2023 г.

Принята к публикации 9 апреля 2023 г.