

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 537.9

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.2.397-408>

Влияние термического отжига на магнитные свойства сплава Hastelloy C-276 с промежуточными буферными слоями $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$

И.В. Янилкин¹ ✉, А.И. Гумаров¹, Д.С. Увин¹, А.Г. Киямов¹,
С.А. Хохорин², Р.Г. Батулин¹

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

²Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

✉ yanilkin-igor@yandex.ru

Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования морфологии поверхности, элементного состава и магнитных свойств подложек Хастеллой С-276 с промежуточными буферными слоями $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$ и напылённым сверхпроводником MgB_2 . Исследование проведено в интервале магнитных полей от -5 Тл до 5 Тл и температурном диапазоне $5-15$ К при различных температурах отжига лент в интервале $623-923$ К. Вакуумный отжиг оказывает значительное влияние на магнитные характеристики подложки, изменение величины удельного магнитного момента в зависимости от температуры отжига составляет 20% в интервале температур $5-15$ К.

Ключевые слова: Хастеллой С-276, термический отжиг, магнетизм, сверхпроводимость, диборид магния, вибрационная магнитометрия

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10088, <https://rscf.ru/project/22-72-10088/>.

Для цитирования: Янилкин И.В., Гумаров А.И., Увин Д.С., Киямов А.Г., Хохорин С.А., Батулин Р.Г. Влияние термического отжига на магнитные свойства сплава Hastelloy C-276 с промежуточными буферными слоями $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$ // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2025. Т. 167, кн. 2. С. 397–408.
<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.2.397-408>.

ORIGINAL ARTICLE

<https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.2.397-408>

Effect of thermal annealing on the magnetic properties of Hastelloy C-276 alloy with intermediate $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$ buffer layers

I.V. Yanilkin¹✉, A.I. Gumarov¹, D.S. Uvin¹, A.G. Kiiamov¹,
S.A. Khokhorin², R.G. Batulin¹

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia

²ITMO University, St. Petersburg, Russia

✉ yanilkin-igor@yandex.ru

Abstract

This article presents the results of an experimental study on the surface morphology, elemental composition, and magnetic properties of Hastelloy C-276 substrates with intermediate $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$ buffer layers and a deposited MgB_2 superconductor. Measurements were carried out at a magnetic field from -5 to 5 T and in the temperature interval from 5 to 15 K, with the annealing temperatures of the tapes in the range from 623 to 923 K. Vacuum annealing had a significant effect on the magnetic characteristics of the substrates, and the specific magnetic moment varied up to 20% depending on the annealing temperature in the temperature interval from 5 to 15 K.

Keywords: Hastelloy C-276, thermal annealing, magnetism, superconductivity, magnesium diboride, vibration magnetometry

Acknowledgments. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-72-10088, <https://rscf.ru/project/22-72-10088/>).

For citation: Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Uvin D.S., Kiiamov A.G., Khokhorin S.A., Batulin R.G. Effect of thermal annealing on the magnetic properties of Hastelloy C-276 alloy with intermediate $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$ buffer layers. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2025, vol. 167, no. 2, pp. 397–408. <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2025.2.397-408>. (In Russian)

Введение

Хастеллой C-276 (англ. Hastelloy C-276) – это сплав, который состоит из следующих основных химических элементов: никель (Ni, ~ 57 вес. %), молибден (Mo, ~ 15 вес. %), хром (Cr, ~ 15 вес. %), вольфрам (W, ~ 4.5 вес. %), железо (Fe, ~ 5 вес. %) и небольших добавок углерода (C), марганца (Mn) и кремния (Si) [1, 2]. Он обладает высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, сохраняет свои механические свойства при

высоких температурах, хорошо поддаётся сварке, механической обработке и формованию. Благодаря этим свойствам Хастеллой С-276 широко используется в различных отраслях промышленности.

Кроме того, сплав служит металлической подложкой при производстве высокотемпературных сверхпроводящих лент второго поколения, которые применяются в качестве подложек для сверхпроводящих соединений, таких как ReBCO [3–7] и MgB_2 [8–10]. Эти соединения используются для производства сверхпроводящих магнитов, в том числе для установок класса мегасайенс.

Несмотря на большое количество работ, посвящённых исследованию термического отжига и его влияния на свойства Хастеллой С-276, практически все они сосредоточены на изучении механических и антикоррозионных свойств сплава [11–13]. Влияние температуры на магнитные свойства сплава на сегодняшний день систематически не изучено. Также известно, что в процессе осаждения буферных слоёв или сверхпроводящих плёнок на ленту из Хастеллой С-276 присутствуют технологические стадии осаждения при повышенной температуре. Это может существенно сказаться на магнитных характеристиках сверхпроводящего провода. Знания о магнитных свойствах исходного сплава Хастеллой С-276 и сплава с нанесёнными буферными слоями во внешнем магнитном поле необходимы при проектировании и намотке сверхпроводящих магнитов.

Таким образом, цель данного исследования – установить, как вакуумный отжиг при разной температуре влияет на магнитные свойства ленты Хастеллой С-276 с нанесёнными на неё буферными слоями и сверхпроводящим слоем диборида магния (MgB_2).

1. Материалы и методы

В настоящей работе в качестве подложки была использована коммерчески доступная лента из материала Хастеллой С-276 (производства ООО «С-Инновации»), покрытая буферными слоями $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$ (рис. 1, а) [3]. Толщина ленты Хастеллой С-276 составляла 42.7 мкм, буферных слоев Al_2O_3 – 30–50 нм, Y_2O_3 – 5–10 нм, MgO – 60–150 нм и LaMnO_3 – 30–50 нм. Методом одновременного магнетронного распыления мишеней магния и бора на верхний буферный слой напылялась сверхпроводящая плёнка MgB_2 . Температура подложки при напылении MgB_2 составляла 555 К. Далее напылялась защитная плёнка кремния. Подробное описание технологии синтеза сверхпроводящей ленты опубликовано в работе [14].

Отжиг образцов проводился в высоком вакууме (не хуже $5 \cdot 10^{-8}$ мбар) в диапазоне температур 623–923 К в течение одного часа. Морфология поверхности подложки и пленки исследовалась сканирующим электронным микроскопом JAMP-9500F, элементный состав изучался с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на спектрометре SPECS, оснащённом полусферическим энергоанализатором Phoibos 150. Исходные и отожжённые образцы были исследованы на рентгеновском дифрактометре D8 Advance (Bruker AXS). Магнитные свойства измерялись методом вибрационной магнитометрии в диапазоне магнитных полей от -5 Тл до $+5$ Тл. Измерения проводились на установке PPMS-9 (Quantum Design) с установленной опцией VSM.

2. Результаты

Изначально лента Хастеллой С-276 с буферными слоями представляет собой гибкую фольгу с достаточно гладкой поверхностью (рис. 1, б). После напыления плёнки диборида

магния поверхность становится сильно развитой (рис. 1, в), что связано с ростом шероховатой пленки MgB_2 . На рис. 2 показаны РФЭ-спектры поверхностей ленты Хастеллой С-276, верхнего буферного слоя LaMnO_3 и плёнки MgB_2 . В поверхностном слое ленты Хастеллой С-276 обнаружены элементы Ni, Cr и Mo в относительном содержании 29.7, 35.2 и 35.1 вес. % соответственно, а также кислород и немного углерода. Данный состав отличается от состава, полученного нами ранее методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС), в котором было гораздо больше никеля и меньше хрома [1]. Это связано с тем, что метод ЭДС является объёмным методом, а РФЭС – поверхностным. Положение пика Cr $2p_{3/2}$ 576.7 эВ указывает на то, что атомы хрома находятся в окисленном состоянии, а положение и форма пика Ni $2p_{3/2}$ 852.8 эВ указывают, что атомы никеля находятся в металлическом состоянии. По-видимому, хром диффундирует к поверхности, образуя защитную плёнку оксида хрома и тем самым обеспечивая высокую коррозионную стойкость.

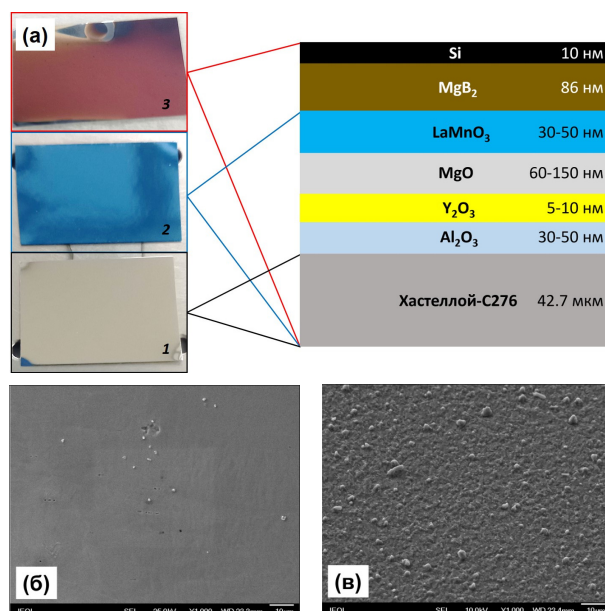


Рис. 1. Образцы ленты Хастеллой С-276 с различными нанесёнными слоями от исходной (а-1), затем буферные слои (а-2) и с нанесённым сверхпроводящим слоем MgB_2 (а-3); расшифровка структуры по слоям и толщина каждого отдельного слоя схематически показаны справа. Морфология поверхности (изображения СЭМ) исходной ленты Хастеллой С-276 с буферными слоями (б) и напылённым слоем MgB_2 поверх буферных слоев (в)

Fig. 1. Hastelloy C-276 tape samples with different layers: the original tape (a-1), with buffer layers (a-2), and with a deposited superconducting MgB_2 layer (a-3); a schematic of the layer-by-layer structure and the thickness of each individual layer are shown on the right. Surface morphology (SEM images) of the original Hastelloy C-276 tape with buffer layers (b) and with a deposited MgB_2 layer on top of buffer layers (c)

Плётка верхнего буферного слоя LaMnO_3 состоит из элементов La, Mn и O, а плётка MgB_2 – из элементов Mg и B (рис. 2). Никаких других элементов не обнаружено. Проведенный анализ состава необходим, чтобы понять природу интегральных магнитных свойств образцов.

Рентгеноструктурный анализ подложки Хастеллой С-276 с буферными слоями показал наличие пиков двух типов, из которых первые соответствуют поликристаллической фазе сплава Хастеллой С-276, вторые – упорядоченной (текстурированной) фазе LaMnO_3 (рис. 3). Другие буферные слои на дифрактограмме не определены, по-видимому, вследствие их малой упорядоченности. После напыления плёнки MgB_2 и отжига образца при 923 К дифракционные рефлексы от LaMnO_3 исчезли, что указывает на взаимодействие MgB_2 и LaMnO_3 (рис. 3). Это подтверждается исследованием Оже-электронов с профилированием, показавшим образование после отжига фазы MgO в интерфейсе MgB_2 и LaMnO_3 [14]. Отметим, что после отжига рефлексы сплава Хастеллой С-276 практически не изменились, только их ширина стала меньше на 6 %. Это может указывать на увеличение размера кристаллитов или уменьшение дефектов и напряжений в них.

Магнитные измерения были проведены в магнитном поле, направленном перпендикулярно плоскости ленты. На рис. 4 показаны магнитополевые зависимости магнитного момента, приведённого на единицу площади, различных образцов: отдельной ленты Хастеллой С-276, ленты с буферными слоями, с плёнкой MgB_2 без вакуумного отжига и с ним. Как видно, большинство образцов проявляют парамагнитные зависимости. Однако образец с плёнкой диборида магния, отожжённый при температуре 673 К, проявляет более сложную зависимость. А именно, помимо безгистерезисной парамагнитной зависимости появляется гистерезисная часть, связанная с пиннингом вихрей Абрикосова в сверхпроводящем слое. Влияние отжига на свойства сверхпроводящей плёнки MgB_2 было детально изучено в работе [14]. Температура сверхпроводящего перехода (T_c) до вакуумного отжига составляла ≈ 15 К, после отжига она увеличивалась до ≈ 22 К. В настоящей работе интегрально представлено влияние отжига на магнитные свойства всей системы.

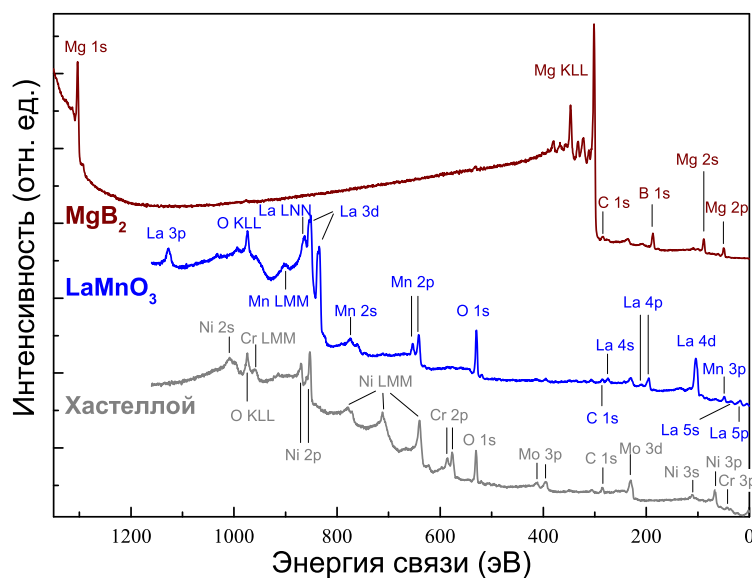


Рис. 2. РФЭ-спектры поверхностей ленты Хастеллой С-276, верхнего буферного слоя LaMnO_3 и плёнки MgB_2

Fig. 2. XPS spectra of the Hastelloy C-276 tape surfaces, upper LaMnO_3 buffer layer, and MgB_2 film

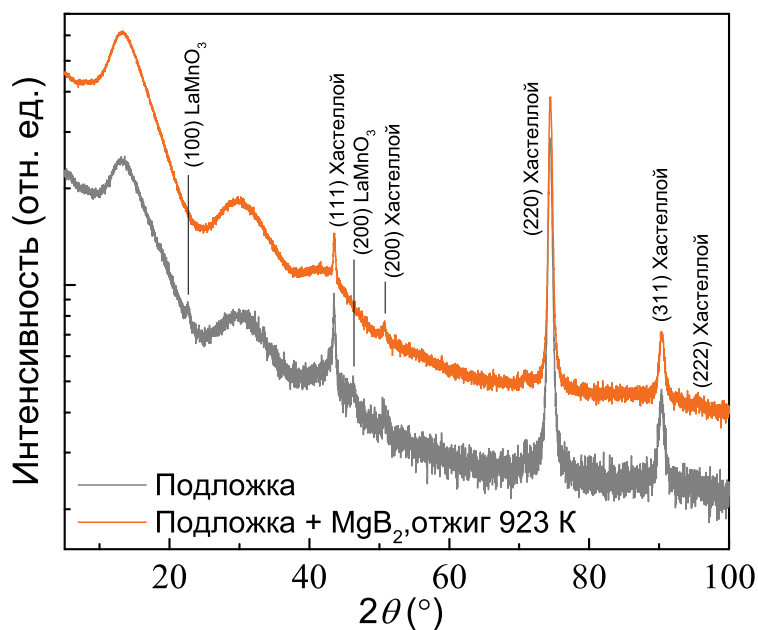


Рис. 3. $\theta - 2\theta$ -дифрактограммы исходной подложки Хастеллой С-276 с буферными слоями и после напыления пленки MgB_2 с отжигом при 923 К

Fig. 3. $\theta - 2\theta$ diffraction patterns of the initial Hastelloy C-276 substrate with buffer layers and after the MgB_2 film deposition with annealing at 923 K

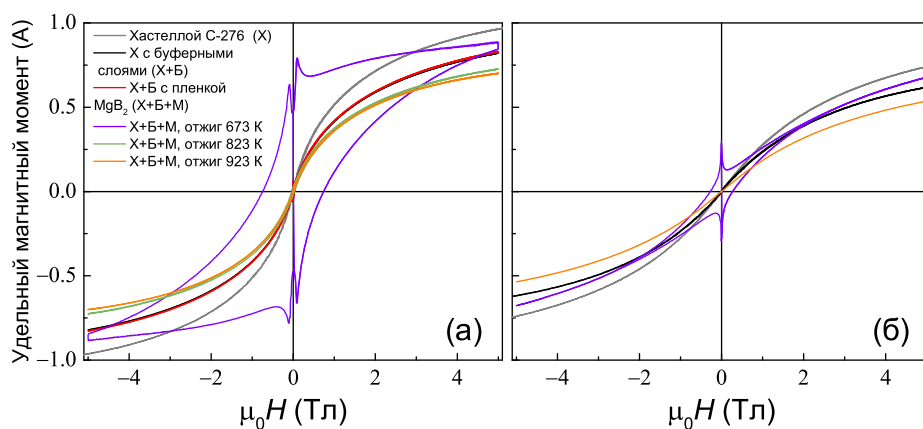


Рис. 4. Магнитополевые зависимости магнитного момента, приведённого на единицу площади, различных образцов: отдельной ленты Хастеллой С-276, ленты с буферными слоями, с пленкой MgB_2 без и вакуумным отжигом, снятые при температуре 5 К (а) и 15 К (б)

Fig. 4. Magnetic field dependencies of the magnetic moment per unit area for different samples: separate Hastelloy C-276 tape, the tape with buffer layers, with MgB_2 film applied without and with vacuum annealing, all data obtained at a temperature of 5 K (a) and 15 K (b)

3. Обсуждение

Чтобы понимать природу изменения магнитных свойств многослойного образца Хастеллой С-276 с буферными слоями и пленкой MgB_2 при вакуумном отжиге, необходимо знать, какими свойствами обладает каждый слой. Хастеллой С-276 – парамагнетик,

Al_2O_3 и MgO – диамагнетики, LaMnO_3 – антиферромагнетик, MgB_2 – сверхпроводник. Однако тонкие пленки MgO и LaMnO_3 могут давать ферромагнитный отклик, связанный с дефектами в пленочной структуре [15–17]. Оценка наибольшего вклада от данных слоев с учетом их реальных толщин в образце дает удельную величину магнитного момента около 0.03 А в поле насыщения 0.5 Тл. Это составляет 3 % от общей величины магнитного момента, что существенно ниже интегрального эффекта от отжига. Кроме того, величины магнитного поля насыщения ферромагнитных петель MgO и LaMnO_3 [15–17] гораздо ниже наблюдаемых в эксперименте. Все это указывает на то, что в изменении магнитного отклика могут участвовать либо Хастеллой С-276, либо MgB_2 . Диборид магния, как мы видим, даже несмотря на малую толщину, может давать существенный вклад в общий магнитный момент. Однако этот вклад имеет гистерезисную природу и легко отделяется от парамагнитного вклада сплава Хастеллой С-276.

Сравнение удельных магнитных моментов ленты Хастеллой С-276 и этой же ленты с буферными слоями указывает на существенное уменьшение (на 16 %) величины магнитного момента (рис. 5), что было указано в работе [1] и было связано с влиянием буферных слоев. Однако наши новые исследования указывают на то, что понижение магнитного момента ленты Хастеллой С-276 после нанесения буферных слоев, вероятно, связано с вакуумным отжигом. Дело в том, что при напылении LaMnO_3 подложка нагревается до 973–1173 К для достижения нужного качества кристаллической структуры [3]. Напыление диборида магния при температуре 555 К не изменяет магнитополевые зависимости удельного магнитного момента. Однако дальнейший отжиг приводит сначала (623–673 К) к повышению, а затем (723–923 К) к уменьшению величины магнитного момента. Причины такого немоного поведения магнитных свойств остаются неизвестными. Отметим, что в указанной области температур (до 923 К) фазовых переходов у Хастеллой С-276 нет [18].

Результаты исследования позволяют лучше понять механизмы изменения магнитных свойств материалов под воздействием термической обработки. Это, в свою очередь, открывает новые возможности для разработки более надёжных и эффективных сверхпроводящих систем.

Заключение

В рамках исследования было изучено, как вакуумный отжиг влияет на магнитные свойства ленты из сплава Хастеллой С-276 с промежуточными буферными слоями $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$ и напылённой сверхпроводящей плёнкой MgB_2 . Выяснилось, что отжиг при высоких температурах (723–1173 К) приводит к уменьшению магнитного момента парамагнитного сплава Хастеллой С-276. При средних температурах (623–673 К), напротив, происходит увеличение магнитного момента. Изменение величины удельного магнитного момента в зависимости от температуры отжига составляет 20 % в интервале температур 5–15 К. Полученные результаты могут быть полезны для оптимизации процессов отжига и повышения эффективности работы сверхпроводящих устройств и имеют важное значение для восстановления обмоток сверхпроводящих магнитов в ускорителях, которые могли деградировать в процессе эксплуатации.

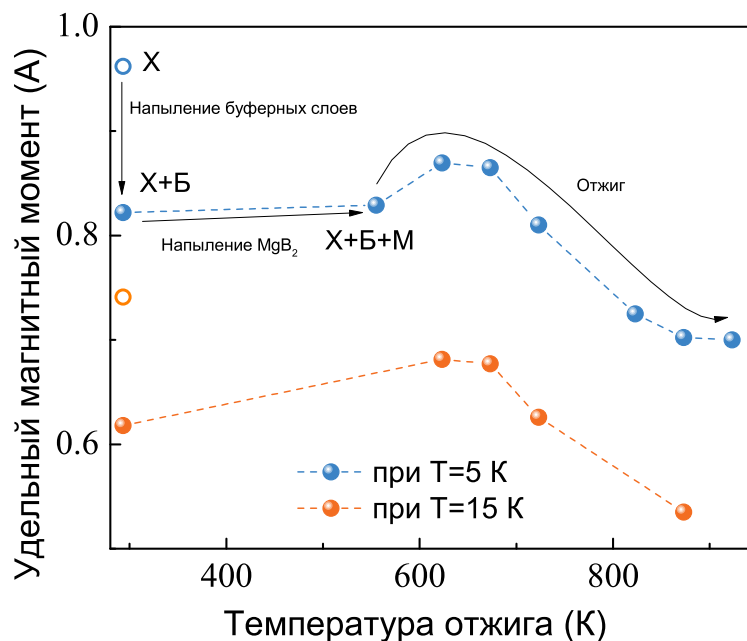


Рис. 5. Зависимость приведенного на единицу площади удельного момента при магнитном поле 5 Тл ленты Хастеллой С-276 с буферными слоями и плёнкой MgB_2 от температуры отжига. Пустые кружки – данные для ленты Хастеллой С-276 без буферных слоёв

Fig. 5. Annealing temperature dependence of the specific moment per unit area at a magnetic field of 5 T of Hastelloy C-276 tape with buffer layers and MgB_2 film. Data on Hastelloy C-276 tape without buffer layers are shown as open circles

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Batulin R., Cherosov M., Kiiamov A., Rudnev I., Khokhorin S., Uvin D., Rogov A., Tayurskii D. The physical properties of Hastelloy[®] C-276TM and Hastelloy[®] C-276TM with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$ buffer layers down to cryogenic temperatures for applications in superconducting magnets // Cryogenics. 2023. V. 137. Art. 103776. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2023.103776>.
2. Lu J., Choi E.S., Zhou H.D. Physical properties of Hastelloy[®] C-276TM at cryogenic temperatures // J. Appl. Phys. 2008. V. 103, No 6. Art. 064908. <https://doi.org/10.1063/1.2899058>.
3. Lee S., Petrykin V., Molodyk A., Samoilencov 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, No 4. Art. 044022. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/27/4/044022>.
4. Zhao Y., Zhu J.-M., Jiang G.-Y., Chen C.-S., Wu W., Zhang Z.-W., Chen S.-K., Hong Y.M., Hong Z.-Y., Jin Z.-J. Progress in fabrication of second generation high temperature superconducting tape at Shanghai Superconductor Technology // Supercond. Sci. Technol. 2019. V. 32, No 4. Art. 044004. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aafa5>.

5. Wang K., Dong H., Huang D., Shang H., Xie B., Zou Q., Zhang L., Feng C., Gu H., Ding F. Advances in second-generation high-temperature superconducting tapes and their applications in high-field magnets // *Soft Sci.* 2022. V. 2, No 3. Art. 12. <https://doi.org/10.20517/ss.2022.10>.
6. Rudnev I., Abin D., Pokrovskii S., Anishchenko I., Starikovskii A., Osipov M. Influence of ion irradiation on critical characteristics of second-generation HTSC tapes // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2022. V. 32, No 4. Art. 8000905. <https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3164629>.
7. Chen Z., Calvi M., Durrell J., Boffo C., Wei D., Zhang K., Zhao Z. Recent progress in high-temperature superconducting undulators // *Superconductivity*. 2024. V. 12. Art. 100134. <https://doi.org/10.1016/j.supcon.2024.100134>.
8. Hata S., Sosiati H., Kuwano N., Tomokiyo Y., Matsumoto A., Fukutomi M., Kitaguchi H., Komori K., Kumakura H. Effects of heat treatments on microstructure formation in MgB₂/YSZ/Hastelloy film // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2005. V. 15, No 2. P. 3238–3241. <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.848834>.
9. Putri W.B.K., Kang B., Van Duong P., Kang W.N. Reducing delamination in MgB₂ films deposited on Hastelloy tapes by applying SiC buffer layers // *Thin Solid Films*. 2015. V. 590. P. 80–83. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.07.057>.
10. Kang B., Putri W.B.K., Kang W.N. Effect of SiC buffer layer on flux pinning property of MgB₂ tapes // *Curr. Appl. Phys.* 2019. V. 19, No 6. P. 670–674. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2019.03.012>.
11. Zhang X.Y., Zhong J., Guo S., Zhao J. Control of deformation and annealing process to produce incoherent $\Sigma 3$ boundaries in Hastelloy C-276 alloy // *Nucl. Mater. Energy*. 2021. V. 27. Art. 100944. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.100944>.
12. Kumar G.S., Sivamaran V., Lokanadham R., Raju C., Mandal T.K. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of pulsed Nd:YAG laser welded dissimilar sheets of Hastelloy C-276 and monel 400 // *Phys. Scr.* 2023. V. 98, No 9. Art. 095933. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aceb3b>.
13. Zhang C., Zhang L., Cui Y., Feng Q., Cheng C. Effects of high-temperature aging on precipitation and corrosion behavior of a Ni-Cr-Mo-based Hastelloy C276 superalloy // *J. Mater. Eng. Perform.* 2020. V. 29, No 3. P. 2026–2034. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04723-y>.
14. Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Rudnev I.A., Fatikhova L.R., Kiiamov A.G., Denisov A.E., Khokhorin S.A., Tayurskii D.A., Batulin R.G. Synthesis of MgB₂ films on Hastelloy-C276 tape with Al₂O₃/Y₂O₃/MgO/LaMnO₃ buffer layers by magnetron sputtering in co-evaporation mode // *Supercond. Sci. Technol.* 2024. V. 37, No 8. Art. 085015. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ad5c09>.
15. Balcells L., Beltrán J.I., Martínez-Boubeta C., Konstantinović Z., Arbiol J., Martínez B. Aging of magnetic properties in MgO films // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 97, No 25. Art. 252503. <https://doi.org/10.1063/1.3527963>.
16. Yufeng C., Wang G., Zhengfeng S., Shenggao W., Yangwu M., Quanrong D., Jingjing Y. Magnetic characteristics of LaMnO_{3+δ} thin films deposited by RF magnetron sputtering in an O₂/Ar mixture gas // *Mater. Res. Express*. 2021. V. 8, No 1. Art. 016101. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abd6a3>.

17. Kim H.S., Christen H.M. Controlling the magnetic properties of LaMnO_3 thin films on $\text{SrTiO}_3(100)$ by deposition in a O_2/Ar gas mixture // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2010. V. 22, No 14. Art. 146007. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/22/14/146007>.
18. Atamert S., Bhadeshia H.K.D.H. Nickel based hardfacing alloys for high temperature applications // *Mater. Sci. Technol.* 1989. V. 5, No 12. P. 1220–1228. <https://doi.org/10.1179/mst.1989.5.12.1220>.

References

1. Batulin R., Cherosov M., Kiiamov A., Rudnev I., Khokhorin S., Uvin D., Rogov A., Tayurskii D. The physical properties of Hastelloy[®] C-276TM and Hastelloy[®] C-276TM with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$ buffer layers down to cryogenic temperatures for applications in superconducting magnets. *Cryogenics*, 2023, vol. 137, art. 103776. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2023.103776>.
2. Lu J., Choi E.S., Zhou H.D. Physical properties of Hastelloy[®] C-276TM at cryogenic temperatures. *J. Appl. Phys.*, 2008, vol. 103, no. 6, art. 064908. <https://doi.org/10.1063/1.2899058>.
3. Lee S., Petrykin V., Molodyk A., Samoilencov 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, no. 4, art. 044022. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/27/4/044022>.
4. Zhao Y., Zhu J.-M., Jiang G.-Y., Chen C.-S., Wu W., Zhang Z.-W., Chen S.-K., Hong Y.M., Hong Z.-Y., Jin Z.-J. Progress in fabrication of second generation high temperature superconducting tape at Shanghai Superconductor Technology. *Supercond. Sci. Technol.*, 2019, vol. 32, no. 4, art. 044004. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aafa5>.
5. Wang K., Dong H., Huang D., Shang H., Xie B., Zou Q., Zhang L., Feng C., Gu H., Ding F. Advances in second-generation high-temperature superconducting tapes and their applications in high-field magnets. *Soft Sci.*, 2022, vol. 2, no. 3, art. 12. <https://doi.org/10.20517/ss.2022.10>.
6. Rudnev I., Abin D., Pokrovskii S., Anishchenko I., Starikovskii A., Osipov M. Influence of ion irradiation on critical characteristics of second-generation HTSC tapes. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2022, vol. 32, no. 4, art. 8000905. <https://doi.org/10.1109/TASC.2022.3164629>.
7. Chen Z., Calvi M., Durrell J., Boffo C., Wei D., Zhang K., Zhao Z. Recent progress in high-temperature superconducting undulators. *Superconductivity*, 2024, vol. 12, art. 100134. <https://doi.org/10.1016/j.supcon.2024.100134>.
8. Hata S., Sosiati H., Kuwano N., Tomokiyo Y., Matsumoto A., Fukutomi M., Kitaguchi H., Komori K., Kumakura H. Effects of heat treatments on microstructure formation in $\text{MgB}_2/\text{YSZ}/\text{Hastelloy}$ film. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2005, vol. 15, no. 2, pp. 3238–3241. <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.848834>.
9. Putri W.B.K., Kang B., Van Duong P., Kang W.N. Reducing delamination in MgB_2 films deposited on Hastelloy tapes by applying SiC buffer layers. *Thin Solid Films*, 2015, vol. 590, pp. 80–83. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.07.057>.
10. Kang B., Putri W.B.K., Kang W.N. Effect of SiC buffer layer on flux pinning property of MgB_2 tapes. *Curr. Appl. Phys.*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 670–674. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2019.03.012>.

11. Zhang X.Y., Zhong J., Guo S., Zhao J. Control of deformation and annealing process to produce incoherent $\Sigma 3$ boundaries in Hastelloy C-276 alloy. *Nucl. Mater. Energy*, 2021, vol. 27, art. 100944. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.100944>.
12. Kumar G.S., Sivamaram V., Lokanadham R., Raju C., Mandal T.K. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of pulsed Nd:YAG laser welded dissimilar sheets of Hastelloy C-276 and monel 400. *Phys. Scr.*, 2023, vol. 98, no. 9, art. 095933. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aceb3b>.
13. Zhang C., Zhang L., Cui Y., Feng Q., Cheng C. Effects of high-temperature aging on precipitation and corrosion behavior of a Ni-Cr-Mo-based Hastelloy C276 superalloy. *J. Mater. Eng. Perform.*, 2020, vol. 29, no. 3, pp. 2026–2034. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04723-y>.
14. Yanilkin I.V., Gumarov A.I., Rudnev I.A., Fatikhova L.R., Kiiamov A.G., Denisov A.E., Khokhorin S.A., Tayurskii D.A., Batulin R.G. Synthesis of MgB_2 films on Hastelloy-C276 tape with $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{MgO}/\text{LaMnO}_3$ buffer layers by magnetron sputtering in co-evaporation mode. *Supercond. Sci. Technol.*, 2024, vol. 37, no. 8, art. 085015. <https://doi.org/10.1088/1361-6668/ad5c09>.
15. Balcells L., Beltrán J.I., Martínez-Boubeta C., Konstantinović Z., Arbiol J., Martínez B. Aging of magnetic properties in MgO films. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, vol. 97, no. 25, art. 252503. <https://doi.org/10.1063/1.3527963>.
16. Yufeng C., Wang G., Zhengfeng S., Shenggao W., Yangwu M., Quanrong D., Jingjing Y. Magnetic characteristics of $\text{LaMnO}_{3+\delta}$ thin films deposited by RF magnetron sputtering in an O_2/Ar mixture gas. *Mater. Res. Express*, 2021, vol. 8, no. 1, art. 016101. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abd6a3>.
17. Kim H.S., Christen H.M. Controlling the magnetic properties of LaMnO_3 thin films on $\text{SrTiO}_3(100)$ by deposition in a O_2/Ar gas mixture. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2010, vol. 22, no. 14, art. 146007. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/22/14/146007>.
18. Atamert S., Bhadeshia H.K.D.H. Nickel based hardfacing alloys for high temperature applications. *Mater. Sci. Technol.*, 1989, vol. 5, no. 12, pp. 1220–1228. <https://doi.org/10.1179/mst.1989.5.12.1220>.

Информация об авторах

Игорь Витальевич Янилкин, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: yanilkin-igor@yandex.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8879-8904>

Амир Илдусович Гумаров, старший научный сотрудник, Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: amir@gumarov.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7250-4377>

Денис Сергеевич Увин, младший научный сотрудник, Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: den.uvin2002@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5970-9559>

Айрат Газинурович Киямов, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: airatphd@kazanfederaluniversity.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5376-7000>

Савелий Артемович Хохорин, студент, Национальный исследовательский университет ИТМО

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5947-2531>

Руслан Германович Батулин, кандидат физико-математических наук, доцент, Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет

E-mail: tokamak@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0184-6580>

Author Information

Igor V. Yanilkin, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Institute of Physics, Kazan Federal University

E-mail: yanilkin-igor@yandex.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8879-8904>

Amir I. Gumarov, Senior Researcher, Institute of Physics, Kazan Federal University

E-mail: amir@gumarov.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7250-4377>

Denis S. Uvin, Junior Researcher, Institute of Physics, Kazan Federal University

E-mail: den.uvin2002@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5970-9559>

Airat G. Kiimov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Institute of Physics, Kazan Federal University

E-mail: airatphd@kazanfederaluniversity.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5376-7000>

Savely A. Khokhorin, Student, ITMO University

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5947-2531>

Ruslan G. Batulin, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Institute of Physics, Kazan Federal University

E-mail: tokamak@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0184-6580>

Поступила в редакцию 17.02.2025

Принята к публикации 19.03.2025

Received February 17, 2025

Accepted March 19, 2025