

УДК 669.721.5'781.4:669.85/.86.018:539.89

EDN BKXTJV

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОЕДИНЕНИЯ MgB_2 ОКСИДАМИ Sm и Gd НА ЕГО КРИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

К.К. Дихтievская^{1,2}, В.В. Анищенко², И.К. Шамова², А.С. Цаплева¹, А.И. Карцев²
¹АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва
²НИТУ «МИСИС»

В работе исследовано влияние легирования MgB_2 оксидами редкоземельных элементов (Gd_2O_3 и Sm_2O_3) на его сверхпроводящие и магнитные свойства. Установлено, что введение 1 мас.% РЗЭ приводит к модификации кристаллической решетки. Магнетометрические измерения показали сужение петель гистерезиса на 15-25% при 4,2 и 20 К, снижение нижнего критического поля (H_{c1}) и уменьшение остаточной намагниченности, что объясняется дестабилизирующим действием парамагнитных ионов РЗЭ на вихревую решетку. Плотность критического тока оценивалась с использованием модели Бина.

Ключевые слова: сверхпроводник, диборид магния, редкоземельные металлы, критическая температура, магнитный гистерезис, модель Бина

EFFECT OF Sm AND Gd OXIDES DOPING ON THE CRITICAL PROPERTIES OF SUPERCONDUCTING MgB_2

K.K. Dikhtievskaya^{1,2}, V.V. Anishchenko², I.K. Shamova², A.S. Tsapleva¹, A.I. Karcev²
¹JSC «A. A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials», Moscow
²NUST MISIS, Moscow

This study investigates the effect of doping MgB_2 with rare-earth oxides (Gd_2O_3 and Sm_2O_3) on its superconducting and magnetic properties. The introduction of 1 wt.% rare-earth elements was found to modify the crystal lattice structure. Magnetometric measurements revealed a 15-25% narrowing of hysteresis loops at 4.2 K and 20 K, along with a decrease in the lower critical field (H_{c1}) and reduced remanent magnetization. These effects are attributed to the destabilizing influence of paramagnetic rare-earth ions on the vortex lattice. The critical current density was evaluated using the Bean model.

Key words: superconductivity, MgB_2 , rare-earth oxides (Sm/Gd), T_c , flux pinning, critical state model

Введение

Открытие сверхпроводимости в дибориде магния (MgB_2) с рекордно высокой для металлических сверхпроводников температурой перехода $T_c \approx 39$ К [1] стало значительным событием в физике конденсированного состояния последних десятилетий. Данный материал обладает рядом уникальных особенностей, сочетая относительно простую гексагональную кристаллическую структуру типа AlB_2 (пространственная группа $R\bar{6}/m\bar{m}\bar{m}$) с необычными сверхпроводящими свойствами [2,3].

Его кристаллическая решётка состоит из чередующихся слоев атомов магния и гексагональных сеток бора, причем именно двумерные σ -орбитали атомов бора играют ключевую роль в формировании сверхпроводящего состояния, поскольку именно куперовские пары σ -дырок ответственны за высокую T_c .

Результаты многочисленных теоретических расчетов и экспериментальных исследований [4-6] убедительно доказали, что MgB_2 является практически классическим БКШ-сверхпроводником с электрон-фононным механизмом спаривания, что подтверждается

таким фактором, как выраженный изотопный эффект (при замене ^{11}B на ^{10}B). К неклассическим свойствам MgB_2 относят слоистую кристаллическую структуру и наличие двух энергетических щелей в спектре возбуждений ($\Delta\sigma \approx 7$ мэВ [7] или по данным [8] $\Delta\sigma \approx 10$ мэВ и $\Delta\tau \approx 2$ мэВ), выявленным методами туннельной спектроскопии [9, 10], а также хорошим согласием экспериментальных данных с предсказаниями теории Элиашберга.

Особый интерес представляет значение параметра Гинзбурга-Ландау $\kappa \approx 26$, которое относит MgB_2 к сверхпроводникам II рода с сильно выраженным вихревым состоянием [11]. Такой высокий параметр κ , наряду с относительно большими значениями верхнего критического поля ($H_{c2}(0) \approx 16$ Тл) и критической плотности тока ($J_c > 10^5$ А/см 2 при 4.2 К) [12], делает этот материал перспективным для практических применений. Однако для реализации его потенциала необходимо решить проблему деградации транспортных свойств в сильных магнитных полях, что особенно актуально для поликристаллических образцов.

Активно исследуются различные подходы к модификации свойств MgB_2 , в том числе легирование углеродом [13, 14], кремнием [15] или нанодобавками оксидов редкоземельных элементов [16]. Однако влияние редкоземельных элементов на критические параметры этого сверхпроводника изучено недостаточно, несмотря на их доказанную эффективность в случае высокотемпературных сверхпроводников.

Так, например, в обзорной работе [17] не приведены данные по влиянию РЗМ на остаточную намагниченность и нижнее критическое поле, а также утверждается, что такие РЗМ, как Gd и Sm, не влияют на кристаллическую решётку.

В данной работе проведён анализ влияния добавок оксидов Gd_2O_3 и Sm_2O_3 в MgB_2 с акцентом на изучение изменений остаточной намагниченности. Полученные результаты важны как для фундаментального понимания природы сверхпроводимости в этом материале, так и для оптимизации его характеристик в практических применениях.

Материалы и методы

Исследуемые образцы диборида магния с легирующими добавками представляли собой порошки, полученные в результате твердофазного высокотемпературного синтеза в среде аргона спрессованных таблеток из исходных порошков прекурсоров и их размола в планетарной мельнице. В качестве исходных материалов использовали высокочистые порошки: порошок бора аморфного, соответствующий ТУ 2112-001-49534204-2003 марки Б-99А с наноразмерными частицами, магния марки МПФ-4 согласно ГОСТ 6001-79 с размером частиц до 100 мкм, порошок оксида гадолиния (III) чистотой 99,99% и размером частиц 3-5 мкм и размером частиц 10-30 мкм и порошок оксида самария (III) чистотой 99,99% и размером частиц до 10 мкм.

Таблица 1

Исследуемые образцы с химическим составом MgB_2 с легирующей добавкой

№, п/п	Легирующий элемент	Кол-во, % масс. доля
1	Чистый MgB_2	
2	Gd_2O_3	1
3		3
4	Sm_2O_3	1
5		2

Фазовый состав образцов определяли с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-4 в геометрии Брэгга-Брентано на монохроматическом $\text{Co-K}\alpha$ излучении с длиной волны 0,179 нм. Фазовый анализ проводили по дифрактограммам образцов в диапазоне угла 2θ от 10° до 120° (рис. 1.). Для обработки дан-

ных применяли полнопрофильный метод Ритвельда с использованием программного комплекса PDXL с базой данных кристаллографических фаз ICDD PDF-2. Были определены параметры решётки для легированных и чистого образцов.

Морфологию и распределение легирующих

элементов исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE).

Измерения намагниченности проводили с помощью магнитометра на установке для исследований физических свойств PPMS-9 при $T = 4,2$ и 20 K в диапазоне магнитных полей ± 90 кЭ. Для определения критической температуры сверхпроводников измерения проводили в режиме ZFC (Zero-field cooled), регистрировали температуру, соответствующую резкому снижению магнитной восприимчивости до отрицательных значений, свидетельствующему о наступлении сверхпроводящего состояния.

Плотность критического тока (магнитный J_c) рассчитывали по высоте петли намагниченности с использованием модели критического состояния Бина [18]. Так как в сверхпроводнике в виде тонкого порошка сильная связь на границах зёрен отсутствует, плотность тока оцени-

вают с учётом среднего размера частиц и определяют по формуле:

$$J_c = \frac{10\Delta M}{\langle d \rangle},$$

где ΔM – изменение намагниченности, $\langle d \rangle$ – геометрический фактор образца.

Геометрический фактор $\langle d \rangle$ определяли с помощью гранулометрического анализа исследуемого порошка сверхпроводящего соединения методом статического лазерного рассеяния на установке Analysette 22 Fritsch.

Также провели оценку остаточной намагниченности для чистого и легированных образцов MgB_2 .

Результаты и обсуждение

Для определения влияния оксидов Gd и Sc на параметры решётки параметры a и c сравнивали с параметрами чистого MgB_2 (таблица 2).

Таблица 2

Результаты рентгеноструктурного анализа

№, п/п	Химический состав		Кол-во, % масс. доля	Кол-во сверхпроводящей фазы, %	Кол-во вторичных фаз (преципитаты), %	Соотношение параметров КР $\Delta(c/a)$, Å
1	MgB_2			95,9	4,1	0
2	MgB_2	Gd_2O_3	1	95,8	4,2	-0,00092
3	MgB_2		3	94,84	5,16	-0,00105
4	MgB_2	Sm_2O_3	1	65,2	34,8	-0,00139

По результатам рентгеноструктурного анализа сделали вывод, что введение оксидов таких редкоземельных элементов в структуру MgB_2 , как Sm, Gd, вероятно, приводит к деформации кристаллической решётки в связи с взаимодействием ионов РЗМ с кристаллической решёткой диборида магния.

Как видно на рис. 1, все основные дифракционные пики соответствуют гексагональной фазе MgB_2 (пространственной группы $P6/mmm$), что подтверждает сохранение

кристаллической структуры после легирования. Небольшие сдвиги пиков в сторону больших 2θ углов свидетельствуют об уменьшении параметра a . Пики, связанные с направлением c , демонстрируют смещение в меньшую сторону 2θ , что соответствует увеличению параметра c . Такие изменения согласуются с внедрением ионов РЗМ с большим ионным радиусом, что приводит к анизотропной деформации решётки, точнее, сжатию в плоскости ab и растяжению вдоль оси c .

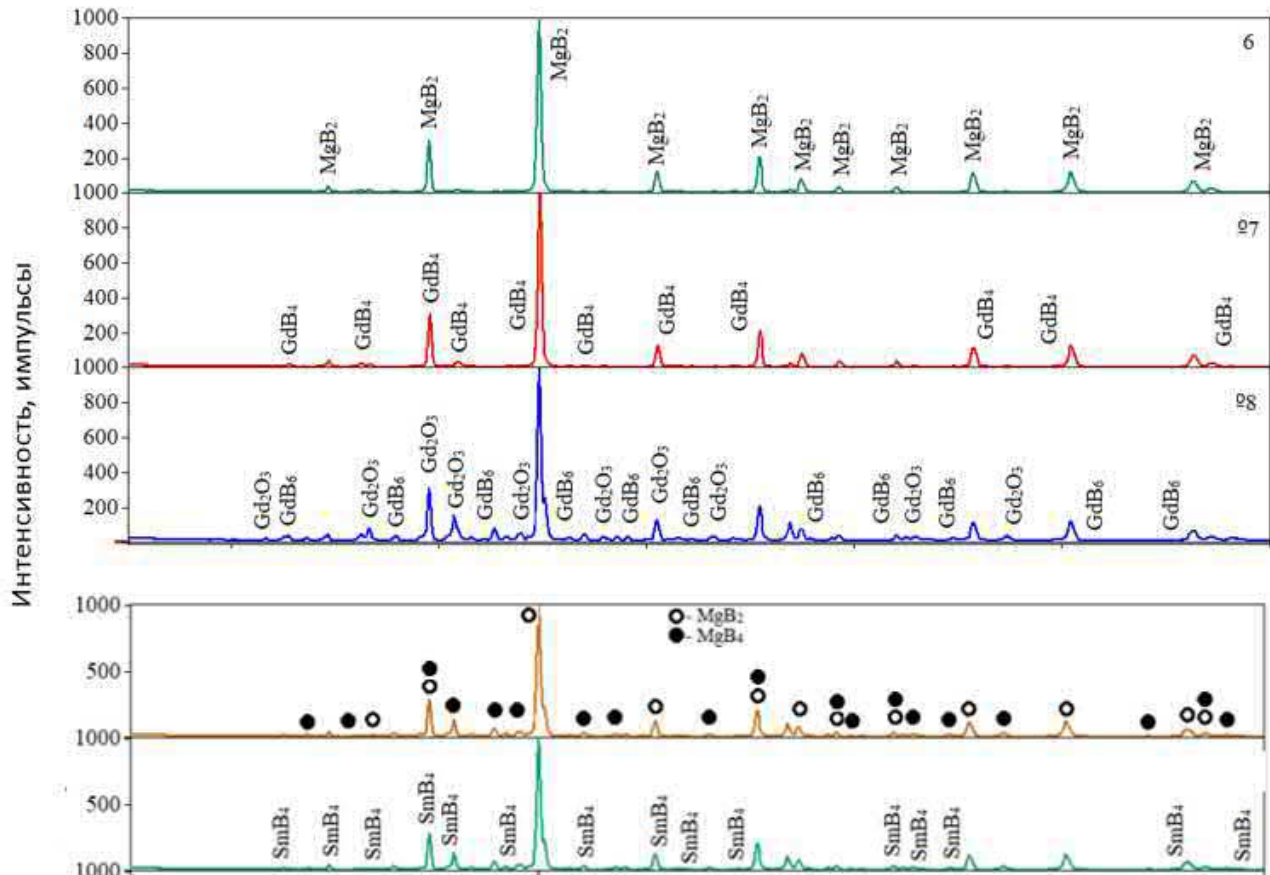


Рис. 1. Дифрактограммы образцов MgB_2 легированного Sm, Gd

Наблюдаемые изменения параметров решётки свидетельствуют о возникновении микронапряжений в кристаллической решётке, вызванных различием ионных радиусов RZ^{3+} (1.05-1.16 Å) и Mg^{2+} (0.72 Å). Анизотропный характер деформации обусловлен пространственным влиянием крупных ионов РЗЭ и жёсткости ковалентных связей В-В в слоях бора. Эти структурные изменения влияют на сверхпроводящие свойства материала, так как микронапряжения могут модифицировать электрон-фононное взаимодействие, критически важное для сверхпроводимости в MgB_2 . Кроме того, локальные искажения вокруг ионов РЗМ создают области с изменённой электронной структурой, что может приводить к неоднородностям в сверхпроводящих характеристиках. На рис. 2. показано, что оксиды Gd и Sm распределены в матрице MgB_2 равномерно, без образования крупных агрегатов (рис. 2.). Это подтверждает, что легирующие элементы интегрированы в структуру, а не образуют отдельные фазы.

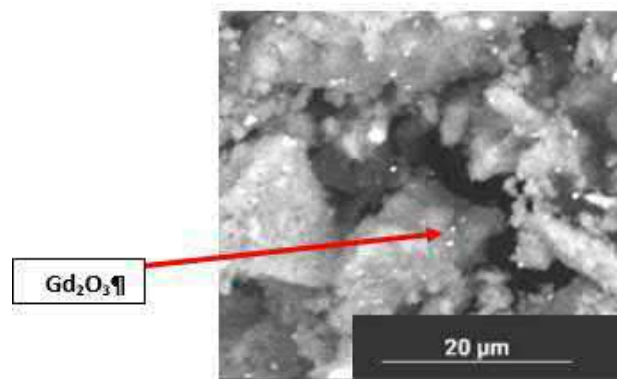


Рис. 2. СЭМ-изображение образца MgB_2 , легированного оксидом Gd

Критическая температура образцов составила ~ 38 К, что несколько ниже значения для чистого MgB_2 (39 К), - это связано со слабым влиянием введения РЗМ на ковалентные связи слоя В-В, которые отвечают за электрон-фононное взаимодействие и критическую температуру. Обладая неспаренными 4f-электронами, Gd и Sm создают локальные магнитные

моменты, однако их влияние на сверхпроводящие куперовские пары существенно подавляется благодаря сильному спин-орбитальному взаимодействию дигборида магния, что отличает РЗМ от таких разрушающих сверхпроводимость примесей, как Fe и Ni, которые вызывают сильное магнитное рассеяние.

При переходе в сверхпроводящее состояние (ниже критической температуры) нелегированные образцы MgB_2 демонстрируют

выраженный диамагнетизм с магнитным моментом около $\sim 1,4$ ед. Однако при введении оксидов Gd, Sm картина меняется: парамагнитные ионы с высокими магнитными моментами, обусловленными не скомпенсированными f-электронами, вносят положительный вклад в намагниченность. Это частично компенсирует диамагнитный отклик матрицы MgB_2 , сохраняя слабоотрицательный магнитный момент (рис. 3.).

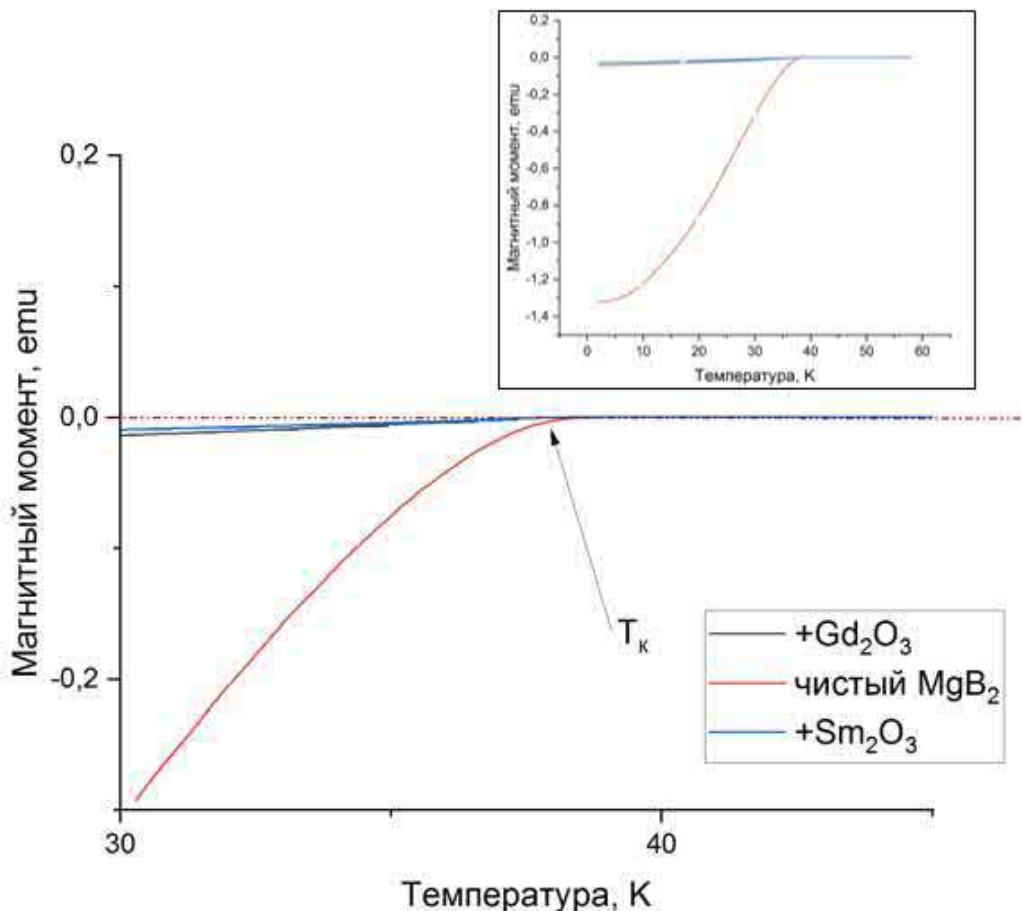


Рис. 3. Кривые температуры перехода в сверхпроводящее состояние для чистого и легированных образцов MgB_2

Несмотря на прогнозируемое падение T_c вследствие сокращения длины когерентности, величина критической температуры остается неизменной. Возможной причиной может являться конкуренция двух эффектов: подавление сверхпроводимости из-за рассеяния на неоднородностях и усиление куперовского спаривания за счёт других механизмов, например, изменения плотности состояний или модификации фононного спектра.

Экспериментальные исследования магнитных характеристик MgB_2 с добавлением окси-

дов редкоземельных элементов выявили изменения в поведении сверхпроводника. Измерения на вибрационном магнитометре показали сужение петель магнитного гистерезиса на 15-25% при температурах 4,2 К и 20 К, что свидетельствует об уменьшении гистерезисных потерь. Этот эффект объясняется влиянием парамагнитных ионов РЗЭ, которые создают локальные магнитные моменты и дестабилизируют сверхпроводящее состояние, что подтверждается уменьшением нижнего критического поля H_{c1} . Например, для чистого

MgB_2 H_{c1} составило 223 мТ, а для легированного Sm_2O_3 – 209 мТ. Такое снижение H_{c1} согласуется с концепцией магнитного подавления сверхпроводимости под действием парамагнитных примесей (рис. 4.).

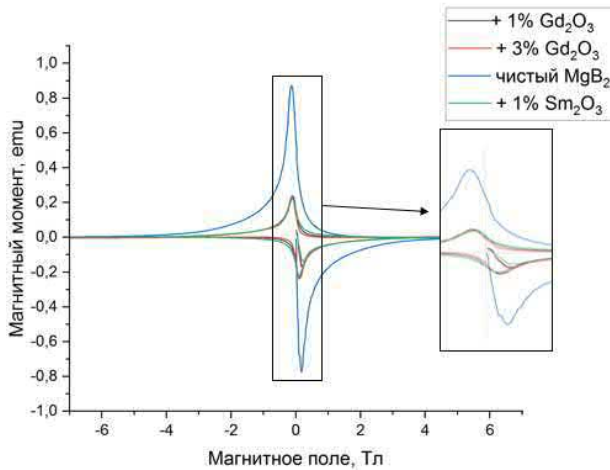


Рис. 4. Петли магнитного гистерезиса при температуре 4,2 К

Теоретическое рассмотрение в рамках модели Абрикосова - Горькова позволяет выделить два конкурирующих процесса: с одной стороны, парамагнитные ионы РЗЭ увеличивают магнитную восприимчивость и способствуют размытию вихревой решетки, с другой - возможное образование наноразмерных включений может создавать дополнительные центры пиннинга. При концентрации 1% масс. доли преобладает первый механизм, что проявляется в снижении критической плотности тока в 1.5-2 раза и уменьшении коэрцитивного поля. Особенно заметно это влияние в области высоких магнитных полей (>3 Тл), где наблюдается нелинейная зависимость $J_c(H)$.

Исследуя значения остаточной намагниченности данных образцов, например $5,14 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ – для чистого образца и $\sim 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ для легированных образцов, можно сделать вывод, что парамагнитные моменты РЗМ создают локальные магнитные поля, которые нарушают упорядоченность вихревой решетки, что указывает на высокую концентрацию легирующих компонентов.

С повышением температуры от 4,2 К до 20 К в сверхпроводнике наблюдается снижение остаточной намагниченности, что связано с усилением тепловых флуктуаций, разрушающих электрон-фононный механизм сверхпроводимости. При более высокой температуре уменьшается плотность сверхпроводящего тока и

ослабляется способность материала удерживать магнитные вихри (Абрикосова) в зафиксированном состоянии, поскольку тепловая энергия преодолевает энергию пиннинга, связанную с дефектами решетки. Это приводит к более раннему началу движения вихрей под действием внешнего магнитного поля и появлению крипа магнитного потока или течению вихрей, то есть к снижению H_{irr} (рис. 5.).

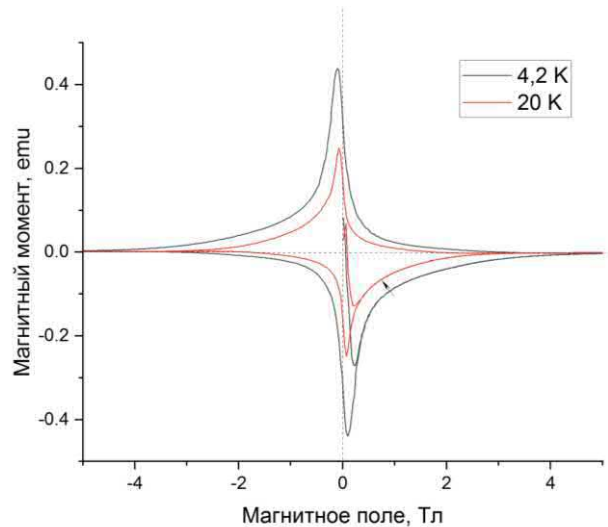


Рис. 5. Петли магнитного гистерезиса MgB_2 , легированного Sm_2O_3 при разных температурах

Падение остаточной намагниченности указывает на уменьшение стабильности распределения вихрей в образце, что связано с их более активной подвижностью и термически индуцированной релаксацией магнитного состояния. Таким образом, снижение всех измеренных магнитных характеристик при повышении температуры отражает уменьшение устойчивости и жесткости сверхпроводящего и магнитного состояний вследствие усиления теплового возмущения.

Особый интерес представляют результаты оценки плотности критического тока J_c , рассчитанной с использованием модели критического состояния Бина. Средний размер частиц, определенный с помощью гранулометрического анализа, составил 20 μ . Эта величина использовалась как размерный фактор при подстановке в уравнение (1). При 4,2 К в поле 1 Тл J_c достигает $3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ для нелегированного образца и $1,3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ в среднем для легированных образцов, демонстрируя снижение эффективного пиннинга магнитных вихрей (рис. 6.). В полях до 5 Тл наблюдается снижение

J_c до 10^3 А/м², однако легированные образцы не показали высокие значения критического тока по сравнению с нелегированным MgB₂, особенно в области высоких полей. Данное явление может быть связано с образованием наноразмерных кластеров из частиц оксидов РЗЭ, что приводит к уменьшению транспортного тока вследствие уменьшения площади раздела сверхпроводник-нормальная фаза.

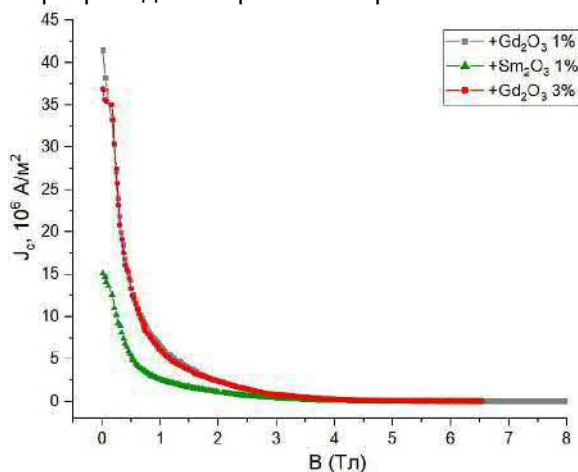


Рис. 6. Зависимость плотности критического тока от индукции магнитного поля при 4,2 К

Выводы

Проведенные исследования показали, что легирование MgB₂ оксидами редкоземельных элементов (Gd₂O₃ и Sm₂O₃) приводит к значительным изменениям его сверхпроводящих и магнитных свойств. Добавление 1 мас. % РЗЭ

приводит к модификации кристаллической структуры (сжатие параметра a и расширение параметра c), не вызывая при этом значительных изменений критической температуры, которая сохраняется на уровне ~ 38 К, характерном для чистого MgB₂. Наблюдается сужение петель магнитного гистерезиса на 15-25% при 4,2 и 20 К, снижение нижнего критического поля (H_{c1}) и уменьшение остаточной намагниченности, что объясняется дестабилизирующим влиянием парамагнитных ионов РЗЭ на вихревую решетку. Плотность критического тока J_c в легированных образцах снижается в 1.5-2 раза при 1 Тл, однако в сильных полях (> 3 Тл) проявляется стабилизирующий эффект потенциальных центров пиннинга.

Полученные результаты демонстрируют необходимость дальнейшей оптимизации состава легированных образцов, включая исследование более низких концентраций РЗЭ ($< 0.5\%$) и их комбинаций с углеродными наночастицами. Особый интерес представляет изучение систем с диспрозием (Dy₂O₃), который может обеспечить усиление пиннинга за счет магнитной анизотропии. Разработанные подходы открывают новые возможности для создания устройств на основе MgB₂ с улучшенными характеристиками в сильных магнитных полях, что важно для практических применений в энергетике и медицинской диагностике. Дальнейшие исследования должны быть направлены на детальное изучение микроструктурных изменений и механизмов взаимодействия РЗЭ со сверхпроводящей матрицей.

Список литературы

1. Nagamatsu J., Nakagawa N., Muranaka T., Zenitani Y., Akimitsu J. Superconductivity at 39 K in magnesium diboride // *Nature*. — 2001. — Vol. 410, № 6824. — P. 63. — DOI: 10.1038/35065039.
2. Mazin I.I., Antropov V.P. Electronic structure, electron-phonon coupling, and multiband effects in MgB₂ // *Physica C: Superconductivity*. — 2003. — Vol. 385, № 1-2. — P. 49-65. — DOI: 10.1016/S0921-4534(03)00251-4.
3. Medvedeva N.I., Ivanovskii A.L., Medvedeva J.E., Freeman A.J. Electronic structure of superconducting MgB₂ and related binary and ternary borides // *Physical Review B*. — 2001. — Vol. 64, № 2. — Art. 020502(R). — DOI: 10.1103/PhysRevB.64.020502.
4. Jiang Y., Liang Y. Comparison of electronic structures, thermodynamic, optical and mechanical properties of MgB₂ and MgMB₄ (M=Al, Pb, W) based on first-principles // *Materials Today Communications*. — 2024. — Vol. 40. — Art. 110055. — DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110055.
5. Hussain M.K. An Ab-Initio Study of Superconductivity in LiAlB₄: an MgB₂-related Compound: MSc Thesis. — York: University of York, 2024. — 120 p.
6. Sahoo B.K., Mishra B.R., Das S., Barik S.K., Patnaik P., Bhuyan R.K., Panda B. Microscopic Study of Two Band Superconductivity in Magnesium Diboride Superconductor (MgB₂) // *American Journal of Physics and Applications*. — 2021. — Vol. 9, № 2. — P. 29-33. — DOI: 10.11648/j.ajpa.20210902.11.

7. Gonnelli R. S., Daghero D., Calzolari A. [и др.] Point-contact spectroscopy in MgB_2 : from fundamental physics to thin-film characterization // *Superconductor Science and Technology*. — 2004. — [Электронный ресурс]. — URL: <https://iopscience.iop.org>

8. Ekino T., Takasaki T., Muranaka T., Akimitsu J., Fujii H. Tunneling spectroscopy of the superconducting gap in MgB_2 // *Physical Review B*. — 2003. — [Электронный ресурс]. — URL: <https://journals.aps.org/prb>

9. Я. Г. Пономарева, С. А. Кузьмичёва, Н. М. Кадомцева, М. Г. Михеева и др. Исследование сверхпроводящей системы $Mg_{(1-x)}Al_xB_2$ методами туннельной и микроконтактной (андреевской) спектроскопии Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики, 2004, том 79, выпуск 10, страницы 597–601

10. Кузьмичёв С.А., Кузьмичёва Т.Е. К 85-летию юбилею профессора Я.Г. Пономарёва: история открытия леггеттовской моды // *Сверхпроводимость: фундаментальные и прикладные исследования*. — 2023. — № 1. — С. 71–77.

11. Matsushita T. Flux Pinning in Superconductors // *Springer Nature*. — 2022. — Ch. 12. — P. 393–419. — DOI: 10.1007/978-3-030-82372-5_12.

12. Hapipi N.M., Chen S.K., Shaari A.H., Kechik M.M.A., Lim K.P., Tan K.B., Lee O.J., Miryala M. Excess Mg in situ powder addition for enhancing critical current density of ex situ MgB_2 // *Journal of Materials Science*. — 2022. — Vol. 128. — Art. 913. — DOI: 10.1007/s10853-022-07657-z.

13. Choi S., Patel D., Kim J.H., Kumakura H., Matsumoto A., Nishijima G., Kim S.-H., Joo J., Maeda M. Evaluation and control of residual amorphous phases in carbon-doped MgB_2 superconductors // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2021. — Vol. 864. — Art. 158867. — DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.158867.

14. Kuznetsova E., Krinitsina T., Blinova Yu., Tsapleva A. Structure and Superconducting Properties of Single-Filamentary $MgB_2/Nb, Cu$ Composite Doped with Carbon Nanotubes // *The Physics of Metals and Metallography* – 2025 – vol. 126:288-298 10.1134/S0031918X24603226

15. Hapipi N.M., Chen S.K., Shaari A.H., Kechik M.M.A., Lim K.P., Shabdin M.K., Tan K.B., Lee O.J., Miryala M. Co-addition of nano-Si and LaB_6 effects on the critical current density of MgB_2 superconductor // *Journal of Alloys and Compounds Communications*. — 2024. — Vol. 3. — Art. 100020. — DOI: 10.1016/j.jacomc.2024.100020.

16. Miryala M., Kitamoto K., Arvapalli S.S., Das D., Jirsa M., Murakami M., Mamidanna S.R.R. Enhancing Critical Current Density of Bulk MgB_2 via Nanoscale Boron and Dy_2O_3 Doping // *Advanced Engineering Materials*. — 2022. — Vol. 24, № 11. — Art. 2200487. — DOI: 10.1002/adem.202200487.

17. Ю.Н. Белотелова, Д.Н. Раков, П.В. Коновалов, М.В. Мальцева, И.М. Абдюханов, М.В. Алексеев Получение порошковых прекурсоров и керамических мишеней для производства высокотемпературных сверхпроводников. // *ВАНТ: Вопросы атомной науки и техники. Серия: материаловедение* – 2022. – № 5. – с. 20-26

18. Gaetan Simon, Muralidhar Miryala Impact of doping on MgB_2 superconductors: A comprehensive review // *Journal of Alloys and Compounds Communications* – 2024. – Vol. 3

19. Bean C.P. Magnetization of hard superconductors // *Physical Review Letters*. — 1962. — Vol. 8, № 6. — P. 250–253. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.8.250.

Поступила в редакцию / Received 26.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 21.07.2025

Принята к публикации / Accepted 21.08.2025

31. Коротаев А.Д., Тюменцев А.Н., Суховаров В.Ф. Дисперсное упрочнение тугоплавких металлов. - Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. - 211 с.
32. Refractory Metal Alloys Metallurgy and Technology / Eds. I. Machlin, R.T. Begley, E.D. Weisert. - Boston, MA: Springer US, 1968.
33. Delgrosso E.J., Carlson C.E., Kaminsky J.J. Development of Niobium-Zirconium-Carbon Alloys // *Journal of the Less Common Metals*. - 1967. - Vol. 12. - P. 173-201.
34. Ditenberg I.A., Tyumentsev A.N., Smirnov I.V., et al. Thermal Stability of Nanostructured Internally Oxidized Vanadium Alloy with Combined Dispersion and Substructural Hardening // *Physical Mesomechanics*. - 2019. - Vol. 22. - P. 496-503.
35. Ditenberg I.A., Smirnov I.V., Grinyaev K.V., Tyumentsev A.N. Influence of Oxygen Concentration on the Formation Features and Thermal Stability of the V-Cr-W-Zr Alloy Microstructure under Combined Treatment Conditions // *Materials Characterization*. - 2020. - Vol. 168. - Art. № 110517.
36. Tyumentsev A.N., Korotaev A.D., Pinzhin Y.P., et al. Effect of the modes of thermomechanical treatment on the formation of the multiphase and grain structure of V-4Ti-4Cr alloys // *Journal of Nuclear Materials*. - 2004. - Vol. 329-333. - P. 429-433.
37. Гриняев К.В., Дитенберг И.А., Тюменцев А.Н., и др. Влияние условий термомеханической обработки на особенности структурно-фазовых трансформаций и уровень механических свойств ванадиевых сплавов разных систем // *Известия высших учебных заведений. Физика*. - 2019. - Т. 62. - № 8. - С. 159-165.
38. Tyumentsev A.N., Korotaev A.D., Pinzhin Y.P., et al. Effect of internal oxidation on the microstructure and mechanical properties of vanadium alloys // *Journal of Nuclear Materials*. - 2007. - Vol. 367-370. - P. 853-857.
39. Chernov V.M., Potapenko M.M., Drobyshev V.A., et al. Microstructure and mechanical properties of V-Me(Cr, W)-Zr alloys as a function of their chemical-thermal treatment // *Nuclear Materials and Energy*. - 2015. - Vol. 3-4. - P. 17-21.
40. Тюменцев А.Н., Дитенберг И.А., Гриняев К.В., и др. Многократная всесторонняя ковка – перспективный способ улучшения свойств сплава V-4Ti-4Cr // *Деформация и разрушение материалов*. - 2011. - № 9. - С. 28-33.
41. Гриняев К.В., Дитенберг И.А. Влияние схемы многократного всестороннего прессования на параметры структуры и механические свойства сплава V-4Ti-4Cr // *Известия высших учебных заведений. Физика*. - 2010. - Т. 53. - № 11-3. - С. 66-68.
42. Дитенберг И.А., Тюменцев А.Н., Гриняев К.В., и др. Влияние режимов термомеханической обработки на микроструктуру и механические свойства сплава V-4Ti-4Cr // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. - 2011. - № 2. - С. 28-35.
43. Тюменцев А.Н., Дитенберг И.А., Гриняев К.В., и др. Микроструктура и механические свойства малоактивируемых ванадиевых сплавов V-4Ti-4Cr-(C, O, N) в зависимости от условий их технологической и термомеханической обработки // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. - 2022. - Т. 45. - № 2. - С. 72-87.
44. Дитенберг И.А., Гриняев К.В., Тюменцев А.Н., и др. Влияние режимов термомеханической обработки на микроструктуру и механические свойства сплавов V-Zr-C // *Известия высших учебных заведений. Физика*. - 2012. - Т. 52. - № 2. - С. 88-93.
45. Дитенберг И.А., Тюменцев А.Н., Гриняев К.В., и др. Особенности микроструктуры и механические свойства сплава V-Zr-C в зависимости от режимов термомеханической обработки // *Перспективные материалы*. - 2013. - № 5. - С. 28-34.
46. Ditenberg I.A., Smirnov I.V., Grinyaev K.V., Tyumentsev A.N. Thermomechanical treatment influence on strength properties of vanadium alloys of V-Me(Cr, W)-Zr system at different temperatures // *Materials Characterization*. - 2022. - Vol. 192. - Art. № 112191.
47. Смирнов И.В., Дитенберг И.А., Тюменцев А.Н., и др. Влияние режима термомеханической обработки на термическую стабильность микроструктуры, механические свойства и особенности разрушения сплава V-Cr-W-Zr // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. - 2022. - Т. 45. - Вып. 3. - С. 50-57.
48. Дитенберг И.А., Смирнов И.В., Цверова А.С., и др. Влияние режимов термомеханической обработки на особенности гетерофазной и зеренной структуры и уровень механических свойств сплава V-Cr-Zr-Ta // *Известия высших учебных заведений. Физика*. - 2018. - Т. 61. - № 5. - С. 115-120.

49. Ditenberg I.A., Smirnov I.V., Grinyaev K.V., et al. Influence of oxygen concentration on mechanical properties and fracture features of V-Me (Cr, W)-Zr-system vanadium alloys at different temperatures // *Materials Science & Engineering A*. - 2023. - Vol. 874. - Art. № 145041.

50. Ditenberg I.A., Smirnov I.V., Grinyaev K.V., et al. Increasing the thermal stability and high-temperature strength of vanadium alloys by strengthening with nanosized non-metallic particles // *Materials*. - 2023. - Vol. 16. - № 6. - Art. № 2430.

51. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. - М.: Атомиздат, 1972. - 600 с.

52. Суханов И.И., Тюменцев А.Н., Дитенберг И.А., и др. Термическая стабильность наноразмерных частиц неметаллических фаз в малоактивируемых ванадиевых сплавов с дисперсным упрочнением // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. - 2022. - Т. 45. - Вып. 2. - С. 88-96.

53. Смирнов И.В., Дитенберг И.А., Гриняев К.В., и др. Влияние температуры отжига на особенности микроструктуры и микротвёрдость карбидноупрочнённого сплава V-Cr-W-Zr // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. - 2024. - Т. 47. - № 2. - С. 80-91.

Поступила в редакцию / Received 02.07.2025

Поступила после рецензирования / Revised 18.09.2025

Принята к публикации / Accepted 20.09.2025