

05

Магнитоупругие эффекты в постоянных магнитах $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ для ондуляторных систем

© А.С. Ромашов, М.В. Колюшенков, А.С. Комлев, А.А. Амиров

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия

E-mail: Romash322@gmail.com

Поступило в Редакцию 2 марта 2026 г.

В окончательной редакции 31 марта 2026 г.

Принято к публикации 1 апреля 2026 г.

Экспериментально исследовано влияние одноосного сжатия до 70 МПа на поле рассеяния постоянных магнитов NdFeB для ондуляторных систем. Методом холловского трехмерного картирования поля зарегистрированы пространственные изменения индукции. Установлено, что наблюдаемые изменения не сводятся к смещению образца, а свидетельствуют о проявлении магнитоупругого эффекта Виллари. Относительное снижение магнитной индукции полей рассеяния при 70 МПа составило $\sim 10^{-2}$. Результаты важны для оценки допустимых механических нагрузок на магниты при проектировании прецизионных ондуляторов с целью обеспечения стабильности пространственного распределения магнитной индукции в их зазоре.

Ключевые слова: NdFeB , эффект Виллари, ондулятор на постоянных магнитах, поля рассеяния.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.13.63143.20665

Под магнитоупругим эффектом, известным также как эффект Виллари, понимается явление, которое заключается в изменении магнитных свойств ферромагнитного материала под действием механических напряжений различной природы (сжатие, растяжение, изгиб, кручение и др.). Магнитоупругий эффект по своей природе является обратным магнитострикции и имеет перспективы применения в магнитной стрейнтронике — направлении в микро- и наноэлектронике, в котором для управления магнитными свойствами и преобразования энергии используются механические деформации [1,2].

С другой стороны, учет магнитоупругих эффектов чрезвычайно важен в технических системах и устройствах, в которых, наоборот, необходимы стабильные магнитные свойства. К таким устройствам относятся ондуляторы — вставные устройства для генерации когерентного синхротронного излучения, которые имеют периодическую структуру дипольных магнитов (постоянные или сверхпроводящие), и электроны, проходящие через периодическую магнитную структуру, вынуждены двигаться с ускорением и таким образом излучать энергию [3,4]. Одними из наиболее распространенных вставных устройств для генерации когерентного синхротронного излучения являются ондуляторы на постоянных магнитах, в которых в качестве источника магнитного поля используются намагниченные блоки постоянных магнитов (NdFeB , SmCo и др.). Ключевая проблема изготовления прецизионных ондуляторов на постоянных магнитах заключается в высоких требованиях к точности магнитной сборки и стабильности свойств постоянных магнитов для получения необходимого пространственного распределения магнитной индукции в рабочем зазоре устройства. Погрешности в распределении магнитной индукции в рабочем зазоре ондулятора влияют на тра-

екторию электронного пучка и снижают интенсивность излучения на заданной частоте. Угловое отклонение электронного пучка определяется первым интегралом магнитного поля по координате вдоль направления его движения, орбитальное смещение электронного пучка определяется вторым интегралом магнитного поля, а качество излучения может быть оценено по средне-квадратичной погрешности индукции магнитного поля в амплитудном значении или фазовой ошибке.

Существуют различные технические решения и алгоритмы настройки ондуляторов, которые связаны как с созданием прецизионных механических систем перемещения магнитных элементов [5,6], так и с расположением блоков постоянных магнитов магнитной сборки в определенной последовательности [7]. Обзор литературы по соответствующей тематике показывает, что практически отсутствуют работы, в которых систематически исследуются явления, связанные с влиянием механических воздействий на магнитные свойства постоянных магнитов [8–10], в частности используемых в современных ондуляторах на постоянных магнитах. Данная проблема является актуальной, поскольку магнитные свойства постоянного магнита в свободном и механически зажатом в ондуляторной сборке состояниях могут различаться, особенно в случае наличия скрытых механических дефектов и неоднородного намагничивания блока постоянного магнита.

С учетом этого была поставлена цель проведения оценки влияния одноосного механического сжатия на остаточную магнитную индукцию B_r $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (NdFeB), которая является одной из основных магнитных характеристик постоянных магнитов. Оценка изменения остаточной магнитной индукции выполнялась путем измерения пространственного

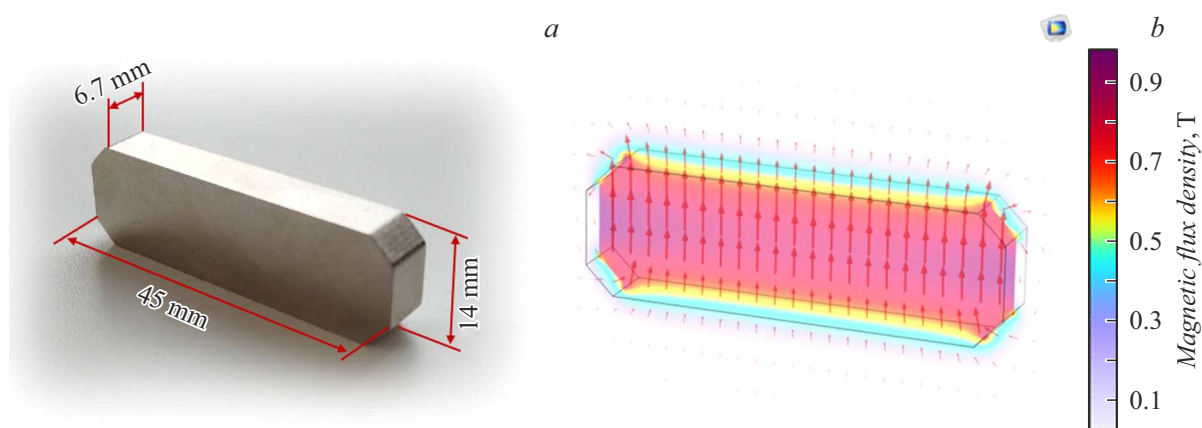


Рис. 1. Исследуемый образец магнита. *a* — фотография образца, *b* — распределение магнитной индукции в плоскости образца, иллюстрирующее направление намагниченности.

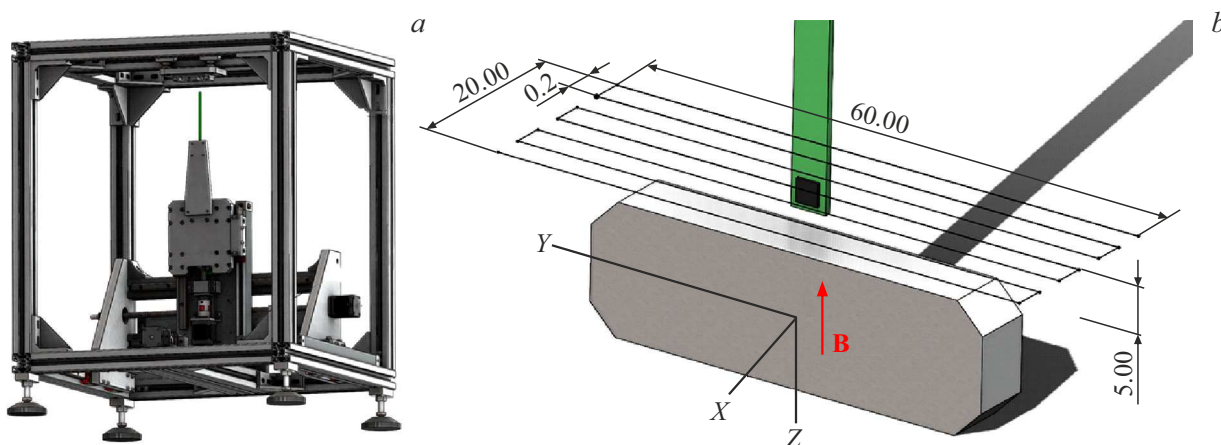


Рис. 2. Экспериментальная установка для измерения магнитного поля. *a* — электронная модель экспериментальной установки, *b* — траектория датчика Холла в ходе эксперимента.

распределения индукции магнитного поля на заданном расстоянии от постоянного магнита. В качестве объекта исследования были использованы образцы постоянных магнитов NdFeB с типоразмерами, соответствующими магнитным элементам, используемым в ондуляторах типа U27 (ESRF, Гренобль, Франция) [11] с периодом $\lambda_U = 27 \text{ mm}$ — одного из распространенных типов вставных устройств, используемых в современных источниках синхротронного излучения третьего и четвертого поколений. Материал постоянного магнита соответствует марке сплава N38EH.

Авторами была разработана установка для трехмерного картирования магнитных полей, представляющая собой датчик Холла AST144SH на трехосевом подвесе. Подвес позволяет перемещать датчик в пространстве по любой траектории в соответствии с заданной программой. Набор линейных энкодеров установки отслеживает перемещения датчика. Сигнал с этих энкодеров выступает триггером для считывания показаний датчика. Таким образом, осуществляются сканирование трехмерной об-

ласти пространства с высоким ($4 \mu\text{m}$) пространственным разрешением и сбор данных о распределении магнитной индукции вокруг образца в автоматическом режиме. Для одноосного сжатия образца с заданным усилием были разработаны и изготовлены тиски из материала с низкой магнитной восприимчивостью, откалиброванные при помощи датчика усилия. Механизм позволяет создавать усилие до 40–45 kN, что для выбранного образца соответствует механическому напряжению 70 МПа.

В ходе эксперимента исследовался образец ондуляторного магнита NdFeB (рис. 1, *a*), намагниченный, как показано на рис. 1, *b*. Образец был сжат в установке для измерения магнитного поля (рис. 2, *a*) с незначительным усилием 2 МПа в направлении оси X . Датчик Холла измерял компоненту B_x вектора магнитной индукции $\mathbf{B}$ и двигался по зигзагообразной траектории (рис. 2, *b*) с шагом между проходами $200 \mu\text{m}$. Всего было проведено 100 проходов; таким образом, сканировалась двумерная прямоугольная область размером $20 \times 60 \text{ mm}$, расположенная на расстоянии 5 mm над торцом магнита.

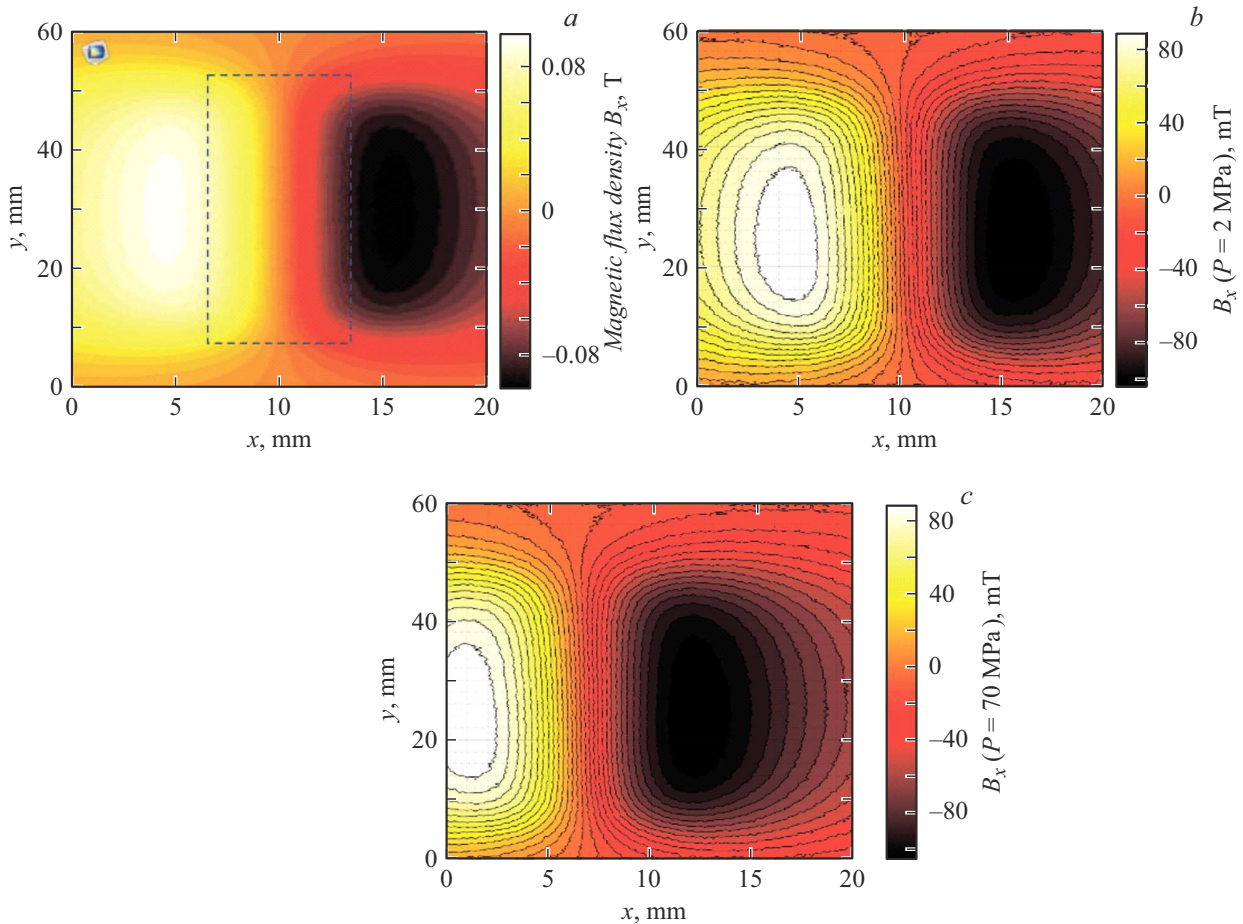


Рис. 3. Результаты исследования магнитного поля образца. *a* — пространственное распределение компоненты вектора магнитной индукции B_x , полученное в результате моделирования в COMSOL Multiphysics (штриховой линией показано расположение магнита в модели); измеренное распределение компоненты вектора магнитной индукции B_x : *b* — усилие сжатия 2 МПа, *c* — усилие сжатия 70 МПа.

В течение каждого прохода с датчика Холла снималось напряжение в 15 000 точек, расположенных через каждые $4\text{ }\mu\text{m}$. Неточности системы перемещения приводили к тому, что количество измеренных точек в разных проходах отличалось на незначительную величину с погрешностью в пределах 5 точек за проход. После этого к магниту была приложена нагрузка 70 МПа и эксперимент повторялся.

Также для верификации результатов измерений было проведено компьютерное моделирование распределения магнитного поля методом конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics. Для моделирования использовался модуль Magnetic Fields, геометрия магнита была аналогична геометрии реального образца, материал магнита — сплав NdFeB, материальные параметры взяты из библиотеки COMSOL [12], величина остаточной намагниченности $B_r = 1.2\text{ T}$. Результаты моделирования представлены на рис. 3, *a*.

В результате экспериментального исследования в каждой из серий измерений было получено около $1.5 \cdot 10^6$ значений искомой компоненты поля. Чтобы скомпенсировать разброс количества точек между проходами,

использовались только первые 14 950 точек каждого прохода. Чтобы уменьшить шум датчика и получить значения поля, в ячейках квадратной сетки применялся медианный фильтр, разрезающий сетку в направлении оси Y . Таким образом, было получено два распределения поля в области $20 \times 59.8\text{ mm}$ с шагом $200\text{ }\mu\text{m}$ в каждом из направлений (рис. 3, *b, c*).

Видно, что приведенные экспериментальные результаты качественно соответствуют результатам компьютерного моделирования, представленным на рис. 3, *a*, однако на рис. 3, *c* заметно смещение магнитного поля образца в направлении, параллельном приложенной нагрузке, которое значительно превышает характерные значения магнитострикции и поэтому может быть вызвано смещением самого образца в ходе нагружения. Для исключения влияния возможных перемещений образца была предпринята попытка сопоставить измеренные облака точек так, чтобы плоскости симметрии измеренных полей совпали (путем вращения и перемещения) (рис. 4).

В результате было установлено, что при нагружении образца давлением 70 МПа в исследованной зоне наблюдаются изменения поля в пределах $\pm 3\text{ mT}$. Заметно, что

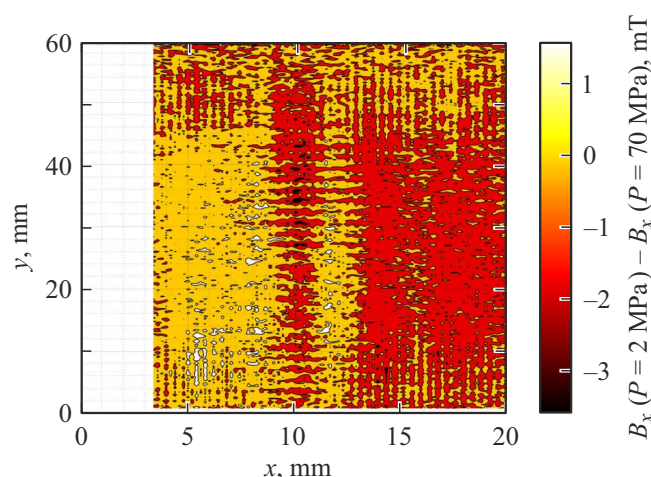


Рис. 4. Разность между полями в нагруженном и ненагруженном состоянии.

в правой части исследуемой области индукция поля в основном увеличилась, а в левой в основном уменьшилась. Такое изменение может быть вызвано поворотом образца вокруг оси Y , и его невозможно скомпенсировать в рамках данного эксперимента. Примечательно, что в плоскости симметрии образца (соответствует координате $x = 10 \text{ mm}$) наблюдается увеличение поля, а левее и правее — уменьшение, что не может быть объяснено каким-либо перемещением образца. Наблюдаемый результат является подтверждением того, что приложение внешних механических напряжений приводит к уменьшению магнитной индукции полей рассеяния от постоянного магнита вследствие эффекта Виллари. Другим возможным объяснением результата является изменение магнитного поля вследствие нарушения целостности образца из-за сжатия с образованием микротрещин, однако существующие исследования [13,14] механических свойств NdFeB не предсказывают такого поведения образца при медленном приложении нагрузки в 70 МПа.

Таким образом, разработанная экспериментальная установка для трехмерного картирования магнитного поля постоянных магнитов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ при контролируемом механическом нагружении позволила экспериментально исследовать влияние одноосного сжатия до 70 МПа на пространственное распределение магнитной индукции вокруг магнита NdFeB . Показано, что наблюдаемые изменения магнитного поля не сводятся к механическому смещению образца и указывают на проявление магнитоупругих эффектов. Полученные результаты важны для выбора конструктивных решений реализации держателей постоянных магнитов и оценки величин допустимых механических воздействий с целью обеспечения стабильности и заданной точности создания пространственного распределения магнитной индукции в зазоре ондуляторных систем на постоянных магнитах.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Bandyopadhyay, npj Spintronics, **2** (1), 15 (2024). DOI: 10.1038/s44306-024-00018-3
- [2] А.А. Бухарасев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов, УФН, **188** (12), 1288 (2018). DOI: 10.3367/UfNr.2018.01.038279 [A.A. Bukharaev, A.K. Zvezdin, A.P. Pyatakov, Yu.K. Fetisov, Phys. Usp., **61** (12), 1175 (2018). DOI: 10.3367/UfNe.2018.01.038279].
- [3] J. Pflueger, in *Free electron lasers and energy recovery linacs*, CERN Yellow Reports: School Proceedings, ed. by R. Bailey (CERN, Geneva, 2018), vol. 1, p. 55–77. DOI: 10.23730/CYRSP-2018-001
- [4] G. Brown, K. Halbach, J. Harris, H. Winick, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **208** (1-3), 65 (1983). DOI: 10.1016/0167-5087(83)91105-5
- [5] A. Temnykh, I. Temnykh, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **968**, 163937 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2020.163937
- [6] N. Strelnikov, I. Vasserman, J. Xu, D. Jensen, O. Schmidt, E. Trakhtenberg, K. Suthar, E.R. Moog, G. Pile, E. Gluskin, Phys. Rev. Accel. Beams, **20** (1), 010701 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.20.010701
- [7] K. Tsuchiya, T. Shioya, Rev. Sci. Instrum., **86** (4), 043305 (2015). DOI: 10.1063/1.4918793
- [8] V.I. Nizhankovsky, Acta Phys. Pol. A, **147** (1), 3 (2025). DOI: 10.12693/APhysPolA.147.3
- [9] V.I. Nizhankovsky, Acta Phys. Pol. A, **147** (5), 380 (2025). DOI: 10.12693/APhysPolA.147.380
- [10] K. Schäfer, M. Lutzi, I. Dirba, L. Schäfer, A. Ali, K. Opelt, I. Radulov, J. Lyubina, W. Diekmann, M. Krenzel, O. Gutfleisch, Adv. Energy Sust. Res., **7** (1), e202500339 (2026). DOI: 10.1002/aesr.202500339
- [11] S.J. Leake, G.A. Chahine, H. Djazouli, T. Zhou, C. Richter, J. Hilhorst, L. Petit, M.-I. Richard, C. Morawe, R. Barrett, L. Zhang, R.A. Homs-Regojo, V. Favre-Nicolin, P. Boesecke, T.U. Schüll, J. Synchrotron Radiat., **26** (2), 571 (2019). DOI: 10.1107/S160057751900078X
- [12] COMSOL AB, COMSOL Multiphysics@ (Stockholm, Sweden) [Электронный ресурс]. www.comsol.com
- [13] H. Wang, C. Ren, Y. Wan, D. Chen, G. Chu, J. Magn. Magn. Mater., **471**, 200 (2019). DOI: 10.1016/j.jmmm.2018.09.083
- [14] L. Li, G. Yang, L. Wang, Q. Wu, J. Alloys Compd., **890**, 161787 (2022). DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161787