

## Магнитные материалы

**Магнитные материалы**, вещества, обладающие магнитными свойствами. Под данное определение попадают практически все известные материалы, поскольку все они содержат электроны и проявляют, по крайней мере, диамагнитные свойства, следовательно, могут называться диамагнитными материалами. Для того чтобы сузить спектр рассматриваемых материалов на практике, в физике и технике под магнитными материалами в первую очередь понимают материалы, обладающие теми или иными сильно выраженными магнитными, магнитотепловыми, магнитоупругими, магниторезистивными или другими свойствами и/или оригинальными магнитными структурами. В магнитных материалах, как правило, в определённой области температур существуют области спонтанной намагниченности (в объёмных материалах они разбиваются на магнитные домены), в которых сохраняется отличная от нуля намагниченность как до, так и после выключения приложенного внешнего магнитного поля. Важно различать термины «магнитный материал» и «магнит». Последний, как правило, обозначает тело или объект, который создаёт своё собственное магнитное поле.

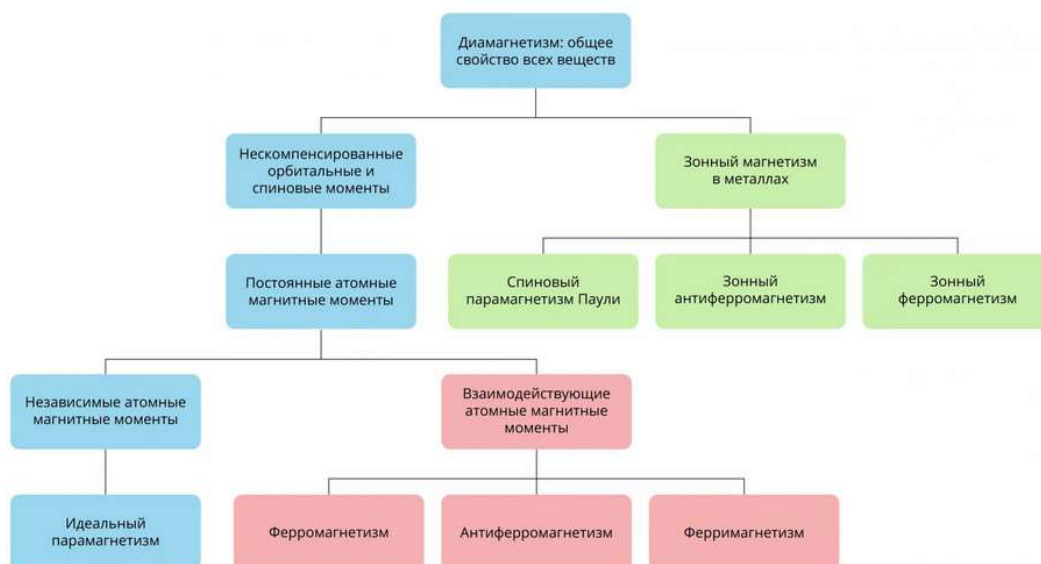


Рис. 1. Виды магнетизма. Архив БРЭ

Характер поведения магнитных материалов зависит от магнитного поля, температуры, давления, и их свойства могут сильно варьироваться при изменении кристаллической и главным образом электронной структуры материала. В зависимости от последней выделяют различные виды магнетизма, классификация которых представлена на рис. 1. Многообразие видов магнетизма обуславливает большое разнообразие типов магнитного

упорядочения, наблюдаемого в магнитных материалах, и является основой для их классификации; выделяют большие классы материалов – ферромагнетики, ферримагнетики, антиферромагнетики, суперпарамагнетики, спиновое стекло, спиновый лёд и др. Кроме того, возможна классификация по химическому составу (например, редкоземельные магнетики, оксиды, халькогениды и др.); по типу кристаллической структуры (например, материалы со структурой шпинели, перовскита, граната и др.); по типу внутреннего строения (поликристаллические, монокристаллические, аморфные); по типу электропроводности (металлы, магнитные полупроводники, магнитные диэлектрики); по форме вещества (магнитные плёнки, порошки, магнитные жидкости, гели, пены, композиционные материалы и др.); по массе (например, магнитомягкая листовая сталь выпускается в виде многотоннажных рулонов, а ярмо лабораторного электромагнита может весить до нескольких сотен килограммов); по целевому назначению (магнитострикционные материалы, термомагнитные сплавы, магнитные диэлектрики, сегнетомагнетики, магнитооптические материалы, материалы для СВЧ и др.).

Внешнее магнитное поле, воздействуя на магнитный материал, может изменять его магнитные, электронные и структурные параметры, что проявляется, например, в изменении геометрических размеров материала (магнитострикция), его электрического сопротивления (магнитосопротивление), температуры (магнитокалорический эффект) и т. д. В ряде магнитных материалов эти эффекты достигают гигантских величин, что обеспечивает их широкое применение в различных областях техники и электроники.

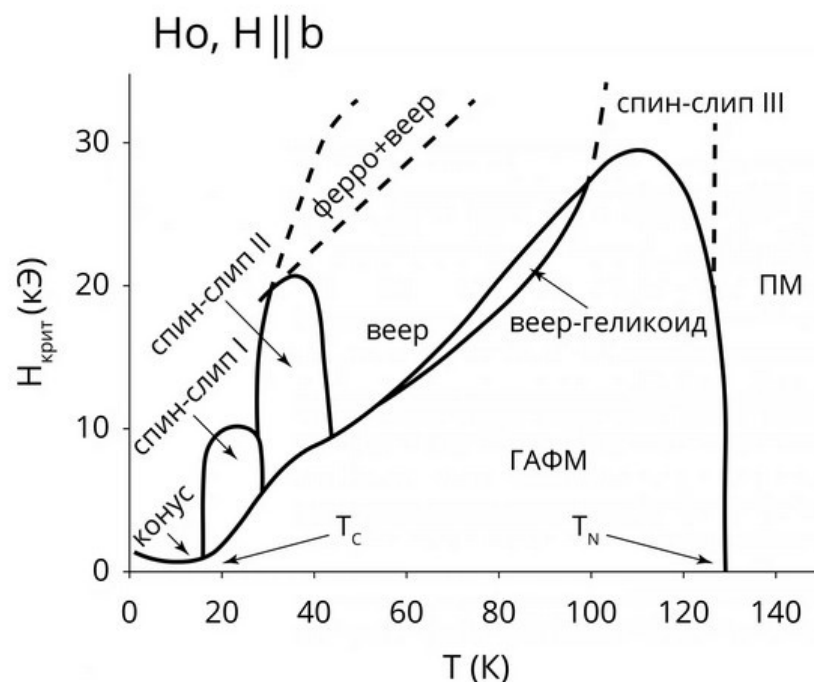


Рис. 2. Магнитная фазовая диаграмма гольмия.

14. В ряде случаев, как, например, в редкоземельных материалах, в зависимости от температур и/или магнитных полей в одном материале могут проявляться различные типы магнитного упорядочения или их комбинации. Так, среди антиферромагнетиков можно выделить ряд редкоземельных материалов с крайне сложными магнитными фазовыми диаграммами: в той или иной области температур и магнитных полей могут существовать, например, геликоидальные, конические, веерные, структуры спинового проскальзывания, а также их комбинации и другие структуры (рис. 2).

Рис. 3. Спектр магнитомягких и магнитотвёрдых материалов. Источник: материалы компании VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG, Hanau.

Классификацию магнитных материалов можно проводить и по их основным характеристикам: намагниченности насыщения  $M_s$ , остаточной намагниченности  $M_r$ , коэрцитивной силе  $H_c$ , магнитной проницаемости  $\mu$ , температуре магнитного фазового перехода (ТС или TN), константам магнитной анизотропии, величинам магнитострикции, магнитосопротивления, магнитокалорического эффекта и др. Магнитные материалы подразделяют на магнитомягкие материалы – материалы с малой величиной  $H_c$  и большими  $\mu$  и  $M_s$ , и магнитотвёрдые материалы – материалы

с большими величинами  $H_c$  и  $M_r$  (рис. 3). Термины «магнитомягкий материал» и «магнитотвёрдый материал» определяют исключительно магнитные свойства материалов и не характеризуют их механические свойства.

Одним из самых хороших и вместе с этим самым дорогих магнитомягких материалов является сплав FeCo с содержанием кобальта 48–50 %, имеющий торговое название пермендюр. Как можно видеть (рис. 4) «моторный» (применяемый в электромоторах и генераторах) сплав Fe50Co50 (Vacoflux 50) имеют величину  $H_c < 0,8$  А/м, что почти в 30 раз меньше магнитного поля Земли. При этом, величина намагниченности насыщения 2,2 Тл данного сплава на 42 % превышает намагниченность соединения FeSi3.

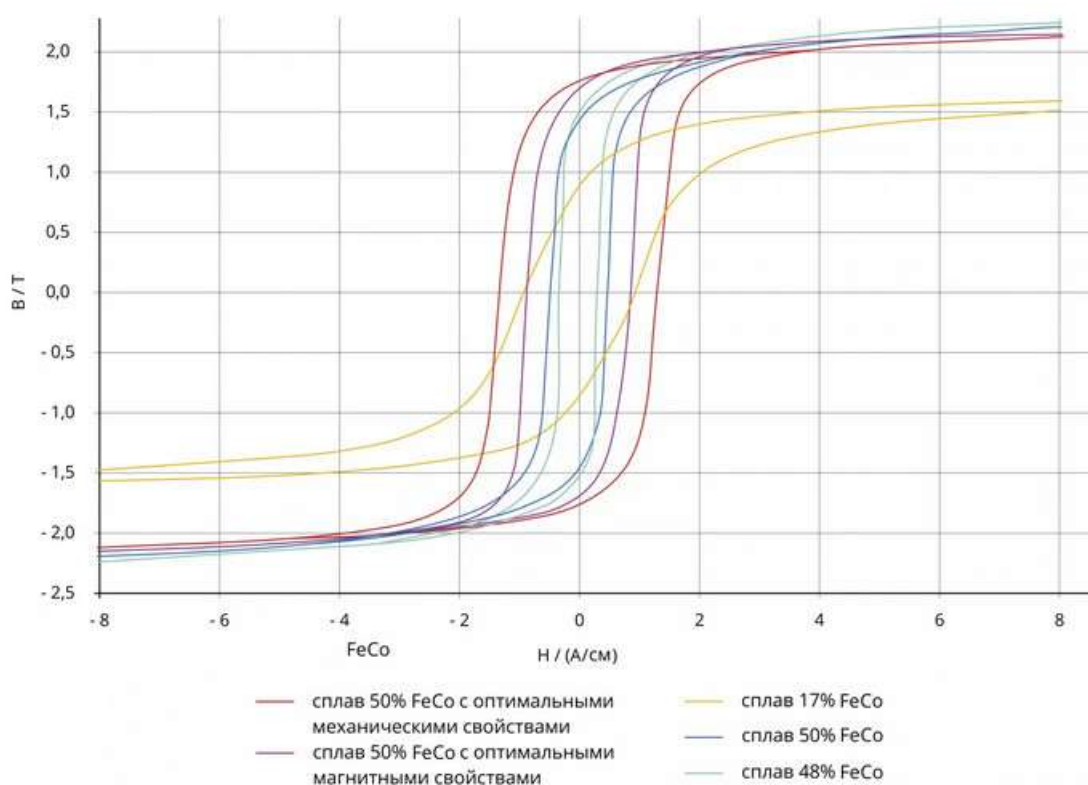


Рис. 4. Статические петли гистерезиса для сплавов FeCo. Репродукция графика из статьи: Soft Magnetic Cobalt-Iron-Alloys. VACOFLUX 48, VACOFLUX 50, VACODUR 50, VACOFLUX 17. Hanau, 2001.

Помимо электротехнических сталей на основе железа, промышленностью освоен выпуск целого ряда других магнитомягких материалов, таких как пермаллой, инвар, ковар и другие, которые выпускаются в виде слитков, проволоки, листов, лент, стержней и т. д.

Применение магнитных материалов определяется общей совокупностью их свойств, а также характером зависимости этих свойств от температуры. Области их применения чрезвычайно разнообразны. Они широко используются: для магнитной записи информации (магнитная лента, магнитные диски, другие магнитные носители); в банковских картах; громкоговорителях, динамиках и микрофонах; электродвигателях и генераторах электрического тока; трансформаторах; компасах; магнитных

держателях; магнитных сепараторах и т. д. Магнитные материалы применяют в диагностике и лечении различных заболеваний (магнитно-резонансная томография, адресная магнитная доставка лекарств, магнитная гипертермия и т. п.).

Магнитные материалы окружают нас в быту. Дверь холодильника остаётся закрытой благодаря притяжению магнитной резины (магнитопласт), расположенной по периметру двери. Магнитный винил используют как основу для наклеек на холодильник. В каждом мобильном телефоне есть три постоянных магнита марки неодим-железо-бор (в вибровызове, динамике и микрофоне). Известно применение магнитных материалов в музыкальных инструментах – например, в электрогитарах используют магнитные пикапы для превращения вибрации струн гитары в электрический ток, который затем может быть усилен.

Тишин Александр Метталинович, Зверев Владимир Игоревич

### **Библиография**

- Вонсовский С. В. Магнетизм : магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферримангнетиков. – Москва : Наука, 1971.
- Bozorth R. M. Ferromagnetism. – Piscataway, N.J. : IEEE Press, 1993.
- Myers H. P. Introductory solid state physics. – 2nd ed. – London : Taylor & Francis, 1997.
- Magnetic and magnetothermal properties and the magnetic phase diagram of single-crystal holmium along the easy magnetization direction / V. I. Zverev , A. M. Tishin , Zou Min, [et al.] // Journal of Physics Condensed Matter. – 2015. – Vol. 27, № 14. – P. 1–9.