

СУПЕР ДИАМАГНЕТИЗМ И МАГНИТНАЯ ЛЕВИТАЦИЯ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

А.В. Касаточкин, С.В. Касаточкин, Е.В. Переведенцева, Ю.П. Тимофеев,
Н.Б. Урьев, М.В. Фок

Изучена анизотропия магнитной восприимчивости углерод-углеродных композитов, обработанных при различных температурах. Найдены образцы с аномально высокой диамагнитной восприимчивостью, обеспечивающие устойчивую магнитную левитацию при комнатной температуре.

Эффект Мейсснера [1] широко используют при поиске и изучении новых материалов с относительно высокой температурой ($T \lesssim 90$ К) перехода в сверхпроводящее состояние. Однако выталкивание исследуемых образцов из области магнитного поля, а при некоторых условиях опыта и их левитация в гравитационном поле Земли — необходимый, но недостаточный признак наличия сверхпроводимости. Действительно, на любом диамагнетике можно осуществить магнитную левитацию при комнатной температуре, и даже более высокой, если только выполняется условие $2\rho g \leq \chi \text{ grad } H^2$, где ρ — плотность, χ — магнитная восприимчивость, H — напряженность магнитного поля.

В согласии с квантовомеханическим обобщением теории Лармора — Ланжевена, экспериментальные значения χ обычно очень малы ($\sim 10^{-6}$), и для левитации диамагнетиков необходимо выполнение значительно более жестких требований к напряженности и неоднородности магнитного поля. Тем не менее, у некоторых полициклических углеродных соединений и графита значения χ аномально велики (до 10^{-4}) и резко анизотропны [2, 4]. Соответствующие эффективные радиусы электронных орбит (8 Å для графита) в десятки раз превышают внутриаомные, что объясняется возникновением молекулярных циркуляционных токов хюккелевского типа в плоскости поликонденсированных графитовых слоев. Однако наличие лишь одной аномально высокой компоненты тензора магнитной восприимчивости у графита значительно осложняет получение устойчивой магнитной левитации из-за переворачивания образцов [3, 4]. В этом отношении особый интерес представляют углерод-углеродные композиты [5, 6], которые, по нашим данным, обладают иным, более благоприятным характером анизотропии магнитной восприимчивости.

Нами исследована магнитная восприимчивость композиций из волокон полиакрилонитрила (ПАН) с кремнефенольными связующими, прокаленных при температуре T_t от 1200 до 2800 °С. В состав образцов по данным химического анализа входит 60-70% графита и 30-40% кремния с небольшими примесями азота и серы, а также, возможно, кислорода и водорода.

Компоненты тензора магнитной восприимчивости в плоскости трудного намагничивания χ_z , ориентированной перпендикулярно волокнам, определялись классическим методом Гюи. Образцы, имеющие форму прямоугольного параллелепипеда, взвешивались в неоднородном магнитном поле с напряженностью до 4 кЭ. Разности главных восприимчивостей $\chi_x - \chi_y$ и $\chi_x - \chi_z$ определялись из измерений периодов крутильных колебаний таких образцов, подвешенных на тонкой упругой нити в отсутствие и при наличии однородного магнитного поля. Для измерения этой анизотропии применялся также вспомогательный метод "щелчка" — измерения угла поворота подвеса упругой нити, при котором происходит переосаживание образцов в новое положение равновесия.

Полученные таким образом средние значения объемной магнитной восприимчивости для низкотемпературной серии образцов ($T_t = 1500$ °С) при направлении магнитного поля вдоль оси x (направления волокна в образце) составляют $\chi_x = + (23,2 \pm 3,1) \cdot 10^{-6}$ СГСМ/см³. В перпендикулярном направлении восприимчивости оказались равными в пределах погрешности эксперимента и составляли $\chi_y = \chi_z = + (17,2 \pm 3) \cdot 10^{-6}$ СГСМ/см³, т.е. эти образцы имеют слабый парамагнетизм. Напротив, серии образцов

с более высокой температурой прокаливания 2500–2800 °С, обладающие по данным рентгеноструктурного анализа более высокой степенью графитизации, оказались диамагнитными. Значения компонент их магнитной восприимчивости лежат в пределах $\chi_x = -(4-5) \cdot 10^{-6}$ и $\chi_y = \chi_z = -(10-21) \cdot 10^{-6}$ СГСМ/см³ для различных образцов. Заметим, что все образцы, не содержащие кремния, оказались парамагнитными, что указывает на важную роль гетероатомов кремния в перестройке структуры углеродных слоев и их взаимной ориентации. При высокотемпературной обработке образцов с кремнием происходит рост размеров пакетов углеродных слоев, а также уменьшение межслоевых расстояний. Соответствующие изменения структуры образцов качественно коррелируют с изменением их магнитных свойств. Поэтому аномально большую диамагнитную восприимчивость естественно связать с наличием надмолекулярных областей циркулирующих токов, аналогичных токам Хюккеля, в плоскости поликонденсированных графитовых слоев.

Дополнительным подтверждением такой интерпретации служит относительно слабая температурная зависимость диамагнитной восприимчивости.

Таким образом, из измерений следует, что компоненты восприимчивости углерод-углеродных комплексов, содержащих волокна ПАН, в плоскости трудного намагничивания могут иметь примерно ту же величину, что и максимальная компонента диамагнитной восприимчивости графита вдоль гексагональной оси. Вместе с тем, средняя величина объемной магнитной восприимчивости этих образцов заметно выше, чем для графита, несмотря на концентрическую упаковку углеродных плоскостей в волокнах ПАН в отличие от плоскостной для графита.

Абсолютная величина и симметрия тензора диамагнитной восприимчивости этих образцов (наличие плоскости трудного намагничивания) позволили получить устойчивую левитацию при вполне умеренных параметрах магнитного поля: $H = 10$ кЭ и $\text{grad } H = 50$ кЭ/см. Эффект магнитной левитации этих материалов, не требующих их охлаждения, может применяться в тех же случаях, в которых используют магнитные подвесы на сверхпроводниках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Линтон Э. Введение в физику сверхпроводников. М., Мир, 1971.
2. Селвуд П. Магнетохимия. М., 1958.
3. Брагинский В. Б. и др. ЖЭТФ, 52, № 1, 29 (1967).
4. Braunbeck W. Zeits. Phys., 112, 764 (1939).
5. Фитцер П. Углерод-углеродные композиционные материалы. М., Мир, 1988.
6. Юрковский И. М. и др. Химия твердого топлива. № 6, 11 (1976).

Поступила в редакцию 28 декабря 1989 г.