

УДК 539.213.27

© 1991

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ «ГИГАНТСКОГО» ΔE -ЭФФЕКТА В АМОРФНЫХ СПЛАВАХ СИСТЕМЫ Fe—B—P

А. С. Аронин, В. А. Кислов, Н. П. Кобелев, Я. М. Сойфер

В аморфных сплавах системы Fe—B—P обнаружено появление после термических отжигов при определенных температурах немонотонной зависимости «гигантского» ΔE -эффекта от магнитного поля, что ранее наблюдалось в аморфных магнитоотрицательных сплавах только лишь в случаях специально наведенной магнитным полем или механическим напряжением магнитной анизотропии. Показано, что такое поведение ΔE -эффекта в исследуемых сплавах Fe—B—P связано с возникновением магнитной анизотропии, перпендикулярной плоскости ленты. Обсуждаются возможные причины появления такой анизотропии при термической обработке.

В нашей недавней работе [1], посвященной исследованию эволюции с температурой упругих свойств аморфного сплава $\text{Fe}_{83}\text{V}_7\text{P}_{10}$, было замечено, что после отжига при определенных температурах зависимость модуля упругости от магнитного поля («гигантский» ΔE -эффект) приобретала немонотонный характер. Такое поведение $E(H)$ наблюдалось ранее только в случае аморфных магнитоотрицательных сплавов с наведенной магнитным полем или упругим напряжением поперечной магнитной анизотропией.

Настоящая работа посвящена подробному исследованию обнаруженного явления, поскольку оно представляет интерес для понимания механизмов «гигантского» ΔE -эффекта и практического его применения. Измерения были выполнены на образцах аморфных сплавов $\text{Fe}_{83}\text{V}_7\text{P}_{10}$, $\text{Fe}_{83}\text{V}_{10}\text{P}_7$, $\text{Fe}_{80}\text{V}_{11}\text{P}_9$. Для сравнения измерялись также и аморфные сплавы системы железо—бор, не содержащие фосфора ($\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$, $\text{Fe}_{82}\text{V}_{18}$, $\text{Fe}_{78}\text{V}_{10}\text{Si}_{12}$, $\text{Fe}_{81}\text{V}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$). Толщина лент, из которых готовились образцы, составляла 20—30 мкм. Ширина образцов, на которых проводились измерения ΔE -эффекта, была 1—3 мм, длина — от 10 до 25 мм. Часть измерений выполнена на образцах в виде вырубленных из ленты колец, внутренний диаметр которых ~ 6 , внешний ~ 12 мм. На кольцевых образцах проводились также измерения динамической петли намагничивания (M от H) на частоте ~ 500 Гц. Методика таких измерений описана в [2].

Измерения ΔE -эффекта проводились магнитоиндуктивным методом на частотах $\sim 100 \div 200$ кГц [3]. Прямоугольные образцы помещались во вставленные друг в друга катушки, одна из которых служила для возбуждения, а другая — для приема сигнала; постоянное магнитное поле, создаваемое катушками Гельмгольца, было направлено вдоль длинной оси образца. Измерялась частота резонанса, соответствующая возбуждению в образцах продольных механических колебаний с длиной волны, равной удвоенной длине образца. Образцы в виде колец помещались в кольцевую кассету, на которую наматывались тороидальные возбуждающая и приемная катушки и тороидальная катушка, служащая для создания постоянного магнитного поля. При этом измерялась резонансная частота, соответствующая возбуждению радиальной моды колебаний

кольца [4]. Термическая обработка образцов проводилась в атмосфере аргона в печах, нагревательные элементы которых выполнены бифилярной намоткой. Измерения ΔE -эффекта и динамической петли намагничивания проводились при комнатной температуре.

На рис. 1 представлены для сравнения результаты влияния термической обработки на характер зависимости ΔE -эффекта от магнитного поля в аморфных сплавах $Fe_{80}B_{20}$ и $Fe_{83}B_{10}P_7$. В исходном (as quenched) состоянии в образцах как того, так и другого типа зависимость $(\Delta E/E)(H)$ обычно является монотонной. Отжиг образцов сплава $Fe_{80}B_{20}$, как и сплавов $Fe_{82}B_{18}$, $Fe_{78}B_{10}Si_{12}$, $Fe_{81}B_{13.5}Si_{3.5}C_2$, при различных температурах (вплоть

до температур, непосредственно предшествующих кристаллизации) приводит к увеличению величины ΔE -эффекта, а зависимость $(\Delta E/E)(H)$ остается монотонной (рис. 1). Однако в сплаве $Fe_{83}B_{10}P_7$ такое поведение $(\Delta E/E)(H)$ наблюдается только при отжигах до температур $< 300^\circ C$. После же отжигов при $\sim 300^\circ C$ и выше зависимость $(\Delta E/E)(H)$ становится немонотонной (рис. 1,

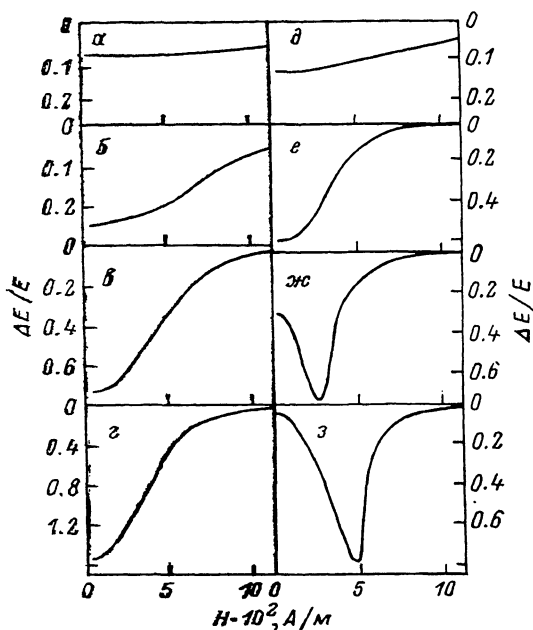


Рис. 1. Влияние термической обработки на зависимости ΔE -эффекта от магнитного поля в образцах аморфных сплавов $Fe_{80}B_{20}$ (а—г) и $Fe_{83}B_{10}P_7$ (д—з).

а, д — исходное состояние; б—з — после однократных отжигов в аргене при $T=250$ (б, е), 300 (в, ж), 350 (г, з), 320 (ж) и $380^\circ C$ (з).

ж, з). Такой же вид носит характер изменения $(\Delta E/E)(H)$ с термической обработкой и в других сплавах Fe—В—Р. Подобная немонотонная зависимость $(\Delta E/E)(H)$ наблюдалась ранее в аморфных магнитострикционных сплавах, но лишь в случае, когда в них была наведена поперечная магнитная анизотропия путем специальной термомагнитной обработки (например, рис. 2, а, кривая 1) либо отжигом в присутствии растягивающего механического напряжения [5]. Теоретически подобный немонотонный характер зависимости ΔE -эффекта от магнитного поля в случае наведенной поперечной магнитной анизотропии может быть объяснен в рамках предложенной Ливингстоном модели «когерентного» вращения магнитных моментов доменов [6], согласно которой максимальная величина ΔE -эффекта определяется выражением

$$(\Delta E/E)_m = 9\lambda^2 E_s M_s^2 H_m^2 / (2K)^3,$$

λ , — коэффициент магнитострикции; E_s , — модуль Юнга в насыщающем магнитном поле; M_s , — намагниченность насыщения; K — энергия наведенной магнитной анизотропии; H_m — внешнее магнитное поле, соответствующее максимуму ΔE -эффекта и равное $H_m = 2K/M_s$.

Для реализации условий, заложенных в модели [6], необходима упорядоченная доменная структура, состоящая из 180° магнитных доменов с векторами намагниченности, лежащими в плоскости ленты перпендикулярно длинной оси образца, что обычно достигается отжигом образцов в поперечном магнитном поле.

Отличие немонотонной зависимости $(\Delta E/E)(H)$, наблюдающейся в данных экспериментах в сплавах системы Fe—В—Р, состоит в том, что она

возникает при термической обработке в отсутствие как магнитного поля, так и внешних механических напряжений. Важно отметить, что характер ΔE -эффекта не зависит от ориентации образцов относительно продольной оси исходной ленты (рис. 2, б). Если бы возникала поперечная магнитная анизотропия, связанная со структурой исходной ленты, то характер ΔE -эффекта в образцах, вырубленных вдоль и поперек ленты, должен был

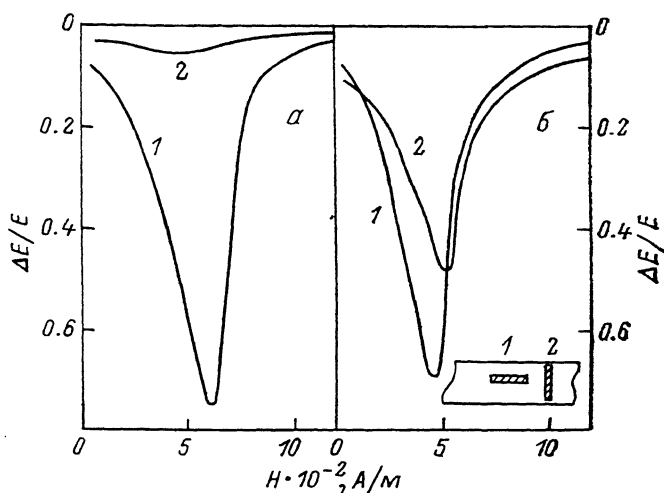


Рис. 2. Зависимости ΔE -эффекта от магнитного поля в образцах аморфных сплавов $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18}$ (а) и $\text{Fe}_{80}\text{B}_{11}\text{P}_9$ (б) после одночасовых отжига в аргоне при 350°C . а — в поперечном (1) и продольном (2) магнитных полях; б — в образцах, вырезанных вдоль (1) и поперек (2) исходной ленты.

резко различаться (так же как в образцах, подвергнутых термомагнитной обработке в продольном или поперечном магнитном полях; рис. 2, а). Однако результаты измерений (рис. 2, б) показывают, что характер изменения $(\Delta E/E)(H)$ в образцах обеих ориентаций одинаков, на основании чего можно заключить, что поперечной магнитной анизотропии

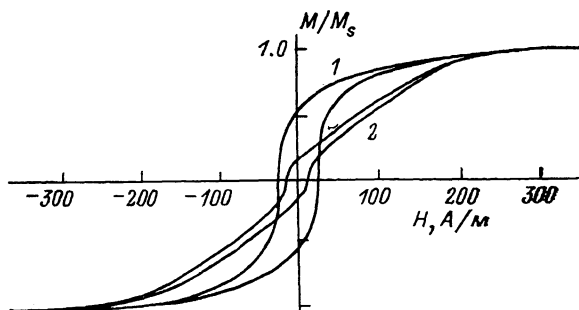
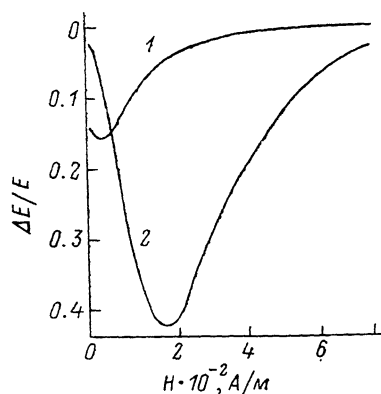


Рис. 3. Динамическая петля намагничивания в аморфном сплаве $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18}\text{P}_{10}$ в исходном состоянии (1) и после одночасового отжига в аргоне при 360°C (2).

(с осью легкого намагничивания (ОЛН), лежащей в плоскости ленты) не возникает. Можно предположить, что в данном случае возникает перпендикулярная магнитная анизотропия с ОЛН, перпендикулярной плоскости ленты. Такое предположение не противоречит модели «когерентного» вращения магнитных моментов доменов [6], поскольку фактически в этой модели необходимо лишь, чтобы ОЛН была перпендикулярна волновому вектору звуковых колебаний и внешнему магнитному полю.

О подобном явлении (возникновении при термической обработке перпендикулярной магнитной анизотропии) сообщалось ранее [7]. Чтобы проверить, возникает ли при термической обработке исследуемых сплавов $\text{Fe}-\text{B}-\text{P}$ перпендикулярная магнитная анизотропия, нами были прове-

ден измерения динамической петли намагничивания в сплаве $\text{Fe}_{83}\text{V}_7\text{P}_{10}$ на кольцевых образцах в исходном состоянии и после термической обработки (рис. 3). Как видно из этого рисунка, в исходном состоянии петля имеет вид, соответствующий равновероятному распределению по ориентациям векторов намагничности доменов, т. е. наблюдается значительный гистерезис зависимости $M(H)$, а величина остаточной намагничности в нулевом поле составляет примерно 0.5 от намагничности насыщения. (Зависимость $M(H)$ в образцах сплава $\text{Fe}_{80}\text{V}_{20}$ имеет аналогичный вид как в исходном состоянии, так и после термической обработки). После отжига сплава $\text{Fe}_{83}\text{V}_7\text{P}_{10}$ при температуре выше 300°C зависимость $M(H)$ становится близкой к линейной, а величина раскрытия петли резко уменьшается (рис. 3). Измерения ΔE -эффекта на этих же образцах (рис. 4)



показали, что после отжига, как и при измерениях на прямоугольных образцах, зависимость $(\Delta E/E)(H)$ становится немонотонной. Все эти данные дают основание сделать вывод, что при термической обработке аморфных сплавов $\text{Fe}-\text{V}-\text{P}$ возникает перпендикулярная магнитная анизотропия с ОЛН, перпендикулярной плоскости ленты. Подобный же вывод был

Рис. 4. Зависимость ΔE -эффекта от магнитного поля в аморфном сплаве $\text{Fe}_{83}\text{V}_7\text{P}_{10}$ (кольцевой образец) в исходном состоянии (1) и после одночасового отжига в аргоне при 360°C (2).

сделан в работе [7], в которой изучалось влияние термических отжигов (в атмосфере водорода и азота) на характер петли намагничивания аморфных сплавов системы $\text{Fe}-\text{Ni}-\text{P}-\text{B}$.

По результатам измерений динамической петли намагничивания, а также ΔE -эффекта (используя выражение $H_m = 2K/M_s$) мы оценили величину энергии наведенной магнитной анизотропии, которая по обеим оценкам оказалась ~ 100 Дж/м³.

Каковы возможные причины возникновения подобного рода наведенной перпендикулярной магнитной анизотропии в исследуемых аморфных сплавах $\text{Fe}-\text{V}-\text{P}$? Однозначного ответа на этот вопрос нет, хотя можно обсудить несколько вариантов объяснения.

Известно [7, 8], что в аморфных сплавах, содержащих фосфор, после термических обработок изменяется концентрация элементов в приповерхностном слое, например увеличивается содержание (в 1.5—2 раза) фосфора и бора [8]. Можно было бы предположить, что из-за различия химических составов приповерхностного слоя и основной массы ленты в нем возникают сжимающие упругие напряжения, с которыми связано появление ОЛН, перпендикулярной плоскости ленты. Однако оценки показывают следующее. Для обеспечения экспериментально наблюдаемой величины энергии анизотропии (~ 100 Дж/м³) с учетом того, что общая толщина искаженного приповерхностного слоя не превышает 1 мкм [7, 8], а толщина ленты > 20 мкм, необходимы величины сжимающих напряжений в этом слое $\sim 10^8$ Н/м², что кажется не очень разумным. Кроме того, как показали наши измерения, удаление поверхностного слоя способом ионной бомбардировки (до ~ 1 мкм) или химического травления (до нескольких мкм) не приводило к исчезновению наведенной анизотропии.

Можно думать, однако, что такие сжимающие напряжения в приповерхностном слое возникают и действуют непосредственно в процессе отжига ленты, что фактически означает термообработку в присутствии механических напряжений, чем и вызывается наведение магнитной анизотропии. Возможно, что в этом случае потребовались бы и меньшие величины напряжений, необходимых для обеспечения наблюдающейся величины

анизотропии. К сожалению, сейчас нет данных, на основании которых можно говорить о том, насколько обоснован такой механизм.

Еще один вариант объяснения, который также рассматривался в [7], тоже связан с изменением концентрации элементов в приповерхностном слое. Состоит он в том, что происходящая при термической обработке диффузия химических элементов в направлении, перпендикулярном поверхности ленты, приводит к их направленному упорядочению, что и вызывает наведение магнитной анизотропии. Однако возможный конкретный механизм такого процесса также не очень ясен.

Таким образом, необходимы дальнейшие исследования этого явления для установления природы наведенной перпендикулярной магнитной анизотропии в аморфных сплавах системы Fe—В—Р.

В заключение хотим выразить благодарность А. В. Серебрякову за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Аронин А. С., Кобелев Н. П., Серебряков А. В., Сойфер Я. М. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 10. С. 3160—3162.
- [2] Кисер И. И. Испытание ферромагнитных материалов. М., 1969. 360 с.
- [3] Кобелев Н. П., Сойфер Я. М., Штейнберг В. Г. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 8. С. 2294—2297.
- [4] Берлинкур Л., Керран Д., Жаффе Г. // Физическая акустика. Т. 1. Ч. А. М., 1966. С. 204—326.
- [5] Nielsen O. V. // IEEE Trans. Magn. 1985. V. 21. N 5. P. 2008—2013.
- [6] Livingston J. D. // Phys. St. Sol. (a). 1982. V. 70. N 2. P. 591—596.
- [7] Imamura M., Sasaki T. // IEEE Trans. Magn. 1984. V. 20. N 5. P. 1385—1387.
- [8] Аронин А. С., Иванов С. А., Якшин А. Е. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 3.

Институт физики твердого тела АН СССР
Черноголовка
Московская область

Поступило в Редакцию
2 апреля 1990 г.