

05

Деформационное намагничивание аморфных ферромагнетиков

© А.А. Гаврилюк, А.Л. Петров, З.Л. Ярычева, С.М. Зубрицкий

Иркутский государственный университет
E-mail: zubr@api.isu.runnet.ru

Поступило в Редакцию 7 мая 2003 г.

Исследованы зависимости величины ΔB_{σ} -эффекта от величины внешнего магнитного поля, частоты переменных упругих напряжений и температуры термомагнитной обработки аморфного ферромагнитного сплава $Fe_{81.5}B_{13.5}Si_3C_2$. Показано, что частота переменных упругих напряжений и температура термомагнитной обработки определяют процессы деформационного намагничивания в исследованном сплаве.

Приложение переменных упругих напряжений к аморфным ферромагнитным сплавам на основе железа приводит к процессу их деформационного намагничивания (ΔB_{σ} -эффект). На величину этого эффекта оказывает влияние значение наведенной одноосной анизотропии образца, его начальная магнитная проницаемость и т.д. [1,2]. С точки зрения практического применения одним из наиболее перспективных аморфных ферромагнетиков является высокомагнитострикционный сплав $Fe_{81.5}B_{13.5}Si_3C_2$, полученный быстрой закалкой из расплава [3]. Поэтому целью настоящей работы являлось исследование влияния на величину ΔB_{σ} -эффекта сплава $Fe_{81.5}B_{13.5}Si_3C_2$ температуры его термомагнитной обработки, значения внешнего магнитного поля H и частоты f переменных упругих напряжений.

Образцы в виде полосок длиной 50 mm, шириной 1 mm и толщиной 25 μm вырезались вдоль оси прокатки сплава. Перед проведением измерений образцы с целью снятия внутренних напряжений и наведения одноосной анизотропии подвергались термомагнитной обработке в интервале температур T от 360 до 450°C в течение 20 min в вакууме 10^{-6} mm Hg. Магнитное поле величиной 40 kA/m в процессе обработки прикладывалось в плоскости образца перпендикулярно его длине. Выбор интервала температур обработки обусловлен тем, что

в исследованном интервале магнитоупругие характеристики сплава $\text{Fe}_{81.5}\text{B}_{13.5}\text{Si}_3\text{C}_2$ максимальны [4].

Образец с размещенной на нем измерительной катушкой индуктивности одним концом жестко крепился на держателе, другой его конец посредством жесткой нити присоединялся к пьезоэлементу, создающему переменные упругие напряжения $\sigma \approx 5 \cdot 10^6$ Па, в диапазоне частот от 5 до 100 кГц. Питание пьезоэлемента производилось от генератора синусоидального тока. Образец помещался в систему катушек Гельмгольца, создающих постоянное магнитное поле H с амплитудой от 0 до 2250 А/м. Для измерения амплитуды снимаемого сигнала измерительная катушка индуктивности подключалась к входу селективного вольтметра, настроенного на ту же частоту, что и генератор синусоидального тока. Величина ΔB_σ определялась как [5]:

$$\Delta B_\sigma = \frac{U}{4f\omega S}, \quad (1)$$

где f — частота колебаний пьезоэлемента, ω — число витков измерительной катушки, S — площадь поперечного сечения образца, U — амплитуда сигнала, снимаемого с измерительной катушки.

В интервале T от 360 до 450°С максимальное значение ΔB_σ -эффекта практически не зависит от T и составляет $(6 \div 7.5) \cdot 10^{-2}$ Т. При $f = 5 \div 25$ кГц наблюдается монотонное уменьшение величины ΔB_σ -эффекта с ростом H . Такое поведение характерно для всех исследованных образцов независимо от T . В диапазоне f от 40 до 60 кГц наблюдается изменение хода зависимости $\Delta B_\sigma = (H)$ (рис. 1, 2). Зависимости $\Delta B_\sigma(H)$ при $f = 40 \div 60$ кГц представляют собой кривые с максимумом. При увеличении T от 380 до 430°С максимум на частоте 40 кГц смещается в область больших H , тогда как максимум при $f \approx 60$ кГц — в область меньших H . При $T = 450^\circ\text{C}$ на зависимости $\Delta B_\sigma(H)$ появляется максимум, соответствующий $f \approx 80$ кГц. Величина максимума составляет $\Delta B_\sigma \approx 3.5 \cdot 10^{-2}$ Т при значении $H \approx 2000$ А/м.

В исследуемых образцах в результате термомагнитной обработки наводится ось легкого намагничивания, перпендикулярная длине полюсок. Величина ΔB_σ -эффекта в магнитном поле H под действием σ в

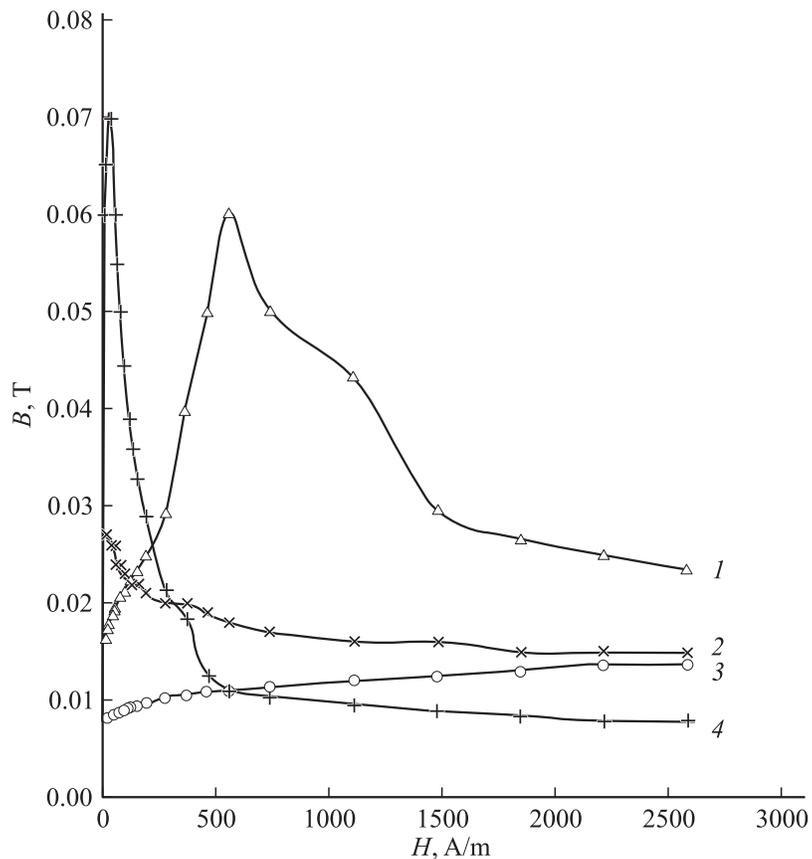


Рис. 1. Зависимость величины изменения индукции ΔB_σ под действием переменных упругих напряжений от величины магнитного поля H для сплава $\text{Fe}_{81.5}\text{B}_{13.5}\text{Si}_3\text{C}_2$, прошедшего термомагнитную обработку при температуре $T = 380^\circ\text{C}$. (1 — 60 kHz, 2 — 10 kHz, 3 — 90 kHz, 4 — 40 kHz).

результате поворота намагниченности может быть записана в виде

$$\Delta B_\sigma(H, \sigma) = B(H, \sigma) - B(H, \sigma = 0), \quad (2)$$

где $B(H, \sigma) = B_S^2 H / (2K - 3\lambda_S \sigma)$, $B(H, \sigma = 0) = B_S^2 H / 2K$, B_S — индукция насыщения образца, K — константа наведенной одноосной ани-

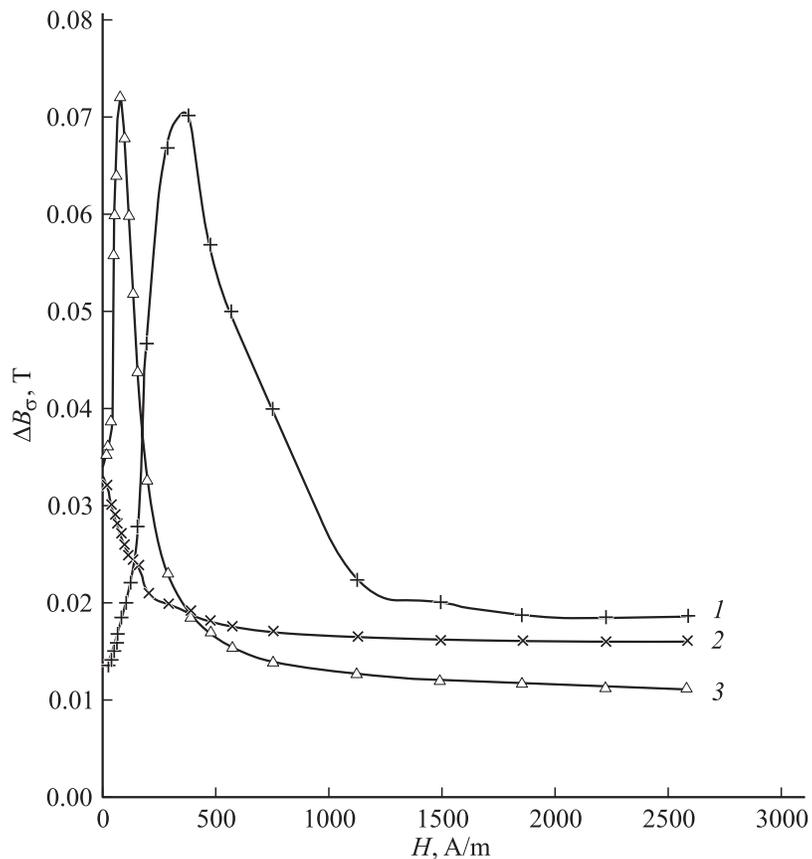


Рис. 2. Зависимость величины изменения индукции ΔB_σ под действием переменных упругих напряжений от величины магнитного поля H для сплава $\text{Fe}_{81.5}\text{B}_{13.5}\text{Si}_3\text{C}_2$, прошедшего термомагнитную обработку при температуре $T = 430^\circ\text{C}$. (1 — 60 kHz, 2 — 10 kHz, 3 — 40 kHz).

зотропии, λ_S — константа магнитострикции. Тогда величина изменения индукции образца под действием напряжений ΔB_σ запишется в виде

$$\Delta B_\sigma = 3\lambda_S\sigma B_S^2 H / (2K(2K - 3\lambda_S\sigma)). \quad (3)$$

Как следует из (3), величина ΔV_σ -эффекта монотонно возрастает с ростом H . Отметим, что выражение (2) справедливо тогда, когда выполняется условие $2K > 3\lambda_s\sigma$. При $\sigma > 2K/3\lambda$ соотношение (2) перестает выполняться. Причина заключается в том, что даже при небольшом H , меньшем, чем поле наведенной анизотропии, приложение $\sigma > 2K/3\lambda_s$ ведет к насыщению образца. При этом соотношение для величины ΔV_σ будет иметь вид

$$\Delta V_\sigma = V_S - (B_S^2 H / (3\lambda_s \sigma - 2K)). \quad (4)$$

Из (4) следует, что с ростом H должно наблюдаться монотонное уменьшение ΔV_σ . Так как значение в процессе измерений $\sigma \approx 5 \cdot 10^6$ Па, а $\lambda_s \approx 3 \cdot 10^{-5}$, то величина $3\lambda_s\sigma/2 \approx 225 \text{ J/m}^3$, что близко по значению к величине K , равной $170 \div 250 \text{ J/m}^3$. Поэтому даже в малых H приложение подобных σ ведет к окончанию процесса поворота намагниченности. Дальнейший рост H приводит к уменьшению ΔV_σ . Обсудим возможные причины возникновения максимумов на зависимостях $\Delta V_\sigma(H)$ в области $f \approx 40 \div 60$ kHz. Механизмом деформационного намагничивания в магнестрикционных ферромагнетиках помимо процесса поворота намагниченности является процесс смещения не 180° -х доменных границ [1,6]. В аморфных ферромагнитных сплавах на основе железа с наведенной одноосной анизотропией возможно существование двух типов не 180° -х доменных границ [7]. Первый тип не 180° -х доменных границ связан с образованием в основных полосовых доменах замыкающих доменов обратной намагниченности. При приложении H , превышающего значение коэрцитивной силы их доменных границ, и σ замыкающие домены начинают прорасти за счет процессов смещения. Можно предположить, что при частотах $40 \div 50$ kHz смещение таких доменных границ вносит основной вклад в ΔV_σ -эффект. При дальнейшем росте f доменные границы в силу инерционности не успевают изменить свое положение, поэтому вклад в ΔV_σ -эффект от процесса их смещения уменьшается. Другим типом не 180° -х доменных границ являются границы, находящиеся в областях внутренних сжимающих напряжений, в которых величина локальной анизотропии, обусловленная напряжениями, выше, чем величина анизотропии, наведенная термомагнитной обработкой. Вследствие этого высока их собственная частота колебаний. Поэтому максимум ΔV_σ -эффекта в магнитных полях, больших поля наведенной

одноосной анизотропии при $f \approx 60$ kHz, может быть связан с процессом смещения таких доменных границ. Подтверждением этого является смещение максимума при $f \approx 60$ kHz с ростом T от 360 до 430°C в область меньших H . Такое поведение максимума ΔV_σ объясняется релаксацией внутренних сжимающих напряжений в сплаве. Можно предположить [8], что при увеличении f выше 60 ÷ 70 kHz доменные границы, находящиеся в областях сжимающих напряжений, не успевают перестраиваться под действием σ . Поэтому их вклад в величину ΔV_σ -эффекта уменьшается.

Таким образом, различные механизмы деформационного намагничивания по-разному зависят от величины внешнего магнитного поля, частоты переменных упругих напряжений и температуры термомагнитной обработки аморфного металлического сплава на основе железа. При приложении упругих напряжений, близких величине $\sigma = 2K/3\lambda_5$ или превышающих ее, основными механизмами, вносящими вклад в ΔV_σ -эффект, являются процессы смещения не 180°-х доменных границ.

Список литературы

- [1] Кекало И.Б., Немова О.Ю., Тараничев В.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 1993. Т. 57. В. 11. С. 188–191.
- [2] Тараничев В.Е., Аленов М.Н. // Металлофизика. 1991. Т. 13. В. 10. С. 84–91.
- [3] Гаврилюк А.А., Гаврилюк А.В., Ковалева Н.П. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 6. С. 50–54.
- [4] Болдырев В.И., Векслер А.С., Гаврилюк А.А. и др. // Изв. вузов. Физика. 1999. В. 9. С. 46–49.
- [5] Фремке А.В. Электрические измерения. М.-Л., 1963. 354 с.
- [6] Тараничев В.Е., Немова О.Ю. // ФТТ. 1996. Т. 38. В. 7. С. 2083–2092.
- [7] Livingston J.D., Morris G. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. N 1. P. 3555–3559.
- [8] Kronmuller H., Fernengel W. // Phys. Stat. Sol. (a). 1981. V. 64. P. 593–602.