

## ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛЯ СТАРТА АМОРФНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Fe И Co ОТ ЧАСТОТЫ И АМПЛИТУДЫ ПЕРЕМАГНИЧИВАЮЩЕГО ПОЛЯ

А. П. Жуков, Б. К. Пономарев

Исследовано влияние частоты  $f$  и амплитуды  $H_0$  перемагничивающего поля на коэрцитивную силу и поле старта аморфных сплавов на основе Fe и Co. Установлено, что поле старта  $H_s$  является функцией скорости изменения перемагничивающего поля. Сделано предположение, что причиной зависимости поля старта от частоты и амплитуды перемагничивающего поля являются микротокки Фуко.

В ряде работ [1, 2] исследовалась зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  аморфных сплавов на основе Fe и Co от частоты и амплитуды внешнего поля. В [1] исследования проводились в интервале частот  $f=0\div 80$  Гц. Установлено, что в аморфных сплавах Fe—Si—B  $H_c$  возрастает пропор-

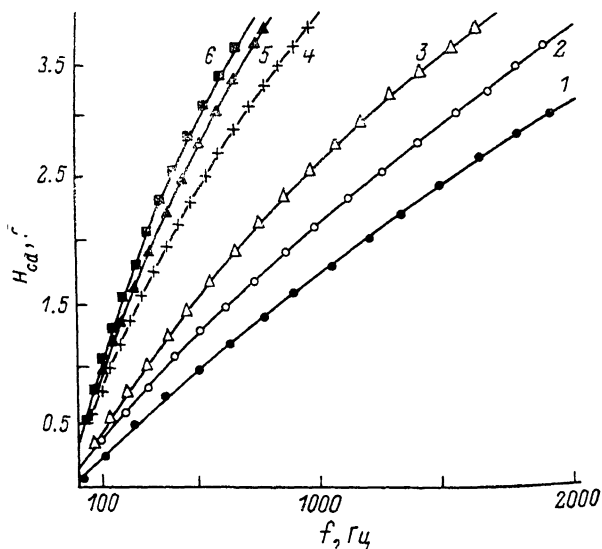


Рис. 1. Зависимость динамической коэрцитивной силы  $H_{cd}$  аморфных сплавов на основе Fe и Co в исходном состоянии от частоты  $f$  и амплитуды  $H_0$  внешнего поля.

1—3 —  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ ; 4, 5 —  $\text{Fe}_{83}\text{B}_{17}$ ; 6 —  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18}$ .  $H_0$ , Э: 1 — 6.4; 2 — 10.4; 3 — 14.4; 4 — 51; 5, 6 — 82.

ционально  $f^{1/2}$ . Обнаружено, что  $H_c$  растет также и при увеличении амплитуды перемагничивающего поля  $H_0$ . В [2] обнаружено, что  $H_c \sim f^{1/2}$ .

В настоящей работе исследована зависимость коэрцитивной силы  $H_c$  и поля старта  $H_s$  от частоты  $f$  и амплитуды  $H_0$  перемагничивающего поля в аморфных сплавах  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ ,  $\text{Fe}_{83}\text{B}_{17}$ ,  $\text{Fe}_{82}\text{B}_{18}$ . Измерения выполнялись при комнатной температуре в интервале частот  $f=0.01\div 2000$  Гц

и амплитуд  $H_0 = 0.15 - 62$  Э. Измерение намагниченности производилось индукционным методом. Питание намагничивающей обмотки осуществлялось генератором Г6-29 в режиме треугольной пилы (с линейным ростом и последующим линейным убыванием тока) и в синусоидальном режиме. Используемая методика позволяла фотографировать петлю гистерезиса с экрана осциллографа и измерять коэрцитивную силу  $H_c$ , поле старта  $H_s$ , остаточную намагниченность  $\sigma_r$  и намагниченность насыщения  $\delta_s$ .

Ниже мы будем называть динамическими коэрцитивную силу  $H_{cd}$  и поле старта  $H_{sd}$ , измеренные в переменном поле ( $f \neq 0$ ) в отличие от статических  $H_c$  и  $H_s$  при  $f=0$ . На рис. 1 изображены экспериментальные за-

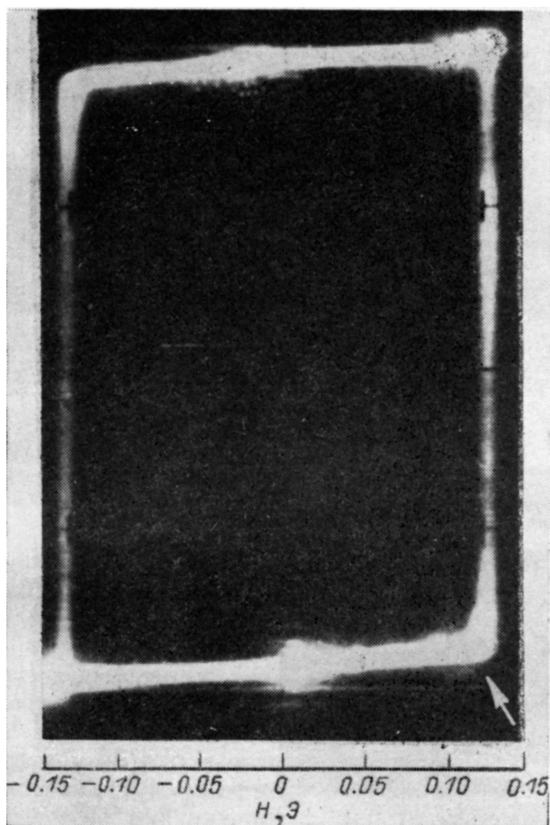


Рис. 2. Осциллограмма петли гистерезиса аморфного сплава  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$  в бистабильном состоянии ( $f=40$  Гц).

висимости  $H_{cd}$  от частоты внешнего поля  $f$  при различных значениях амплитуды внешнего поля  $H_0$  для аморфных сплавов  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ ,  $\text{Fe}_{82}\text{V}_{18}$ ,  $\text{Fe}_{83}\text{V}_{17}$  в исходном состоянии. Образцы имели плавную петлю гистерезиса. Поле со временем менялось по синусоидальному закону. Из рис. 1 видно, что  $H_{cd}$  растет при увеличении  $f$  и  $H_0$ . Зависимости  $H_{cd} \sim f^{1/2}$  и  $H_{cd} \sim f^{1/3}$ , наблюдавшиеся в [1, 2], в данном случае не имеют места.

В [3] нами сообщалось о формировании бистабильного состояния в аморфном сплаве  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$  в результате термообработки. Петля гистерезиса бистабильных образцов имеет прямоугольную форму (рис. 2). При уменьшении амплитуды внешнего поля ниже поля старта  $H_s$  (на рис. 2  $H_s$  показано стрелкой) петля гистерезиса в бистабильном состоянии пропадает скачком, т. е. частные петли гистерезиса не наблюдаются. Тот факт, что два устойчивых состояния с намагниченностью  $\sigma = \pm \sigma_r$  разделены областью неустойчивости с  $-\sigma_r < \sigma < +\sigma_r$ , и позволяет считать магнитное состояние образцов бистабильным.

Мы исследовали влияние частоты и амплитуды внешнего поля на вид петли гистерезиса аморфного сплава  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_3\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$  в бистабильном состоянии. На рис. 3, *a—e* представлены осциллограммы петель гистерезиса бистабильных образцов  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_3\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$  при увеличении  $f$  и  $H_0$ . Видно, что рост  $f$  и  $H_0$  приводит к расширению петли гистерезиса. При малых  $f$  и  $H_0$  петля гистерезиса расширяется с ростом  $f$  и  $H_0$ , оставаясь прямоугольной. В этом интервале  $f$  и  $H_0$  зависимости  $H_{cd}$  и  $H_{sd}$  практически совпадают (рис. 3, *a*). При дальнейшем увеличении  $f$  и  $H_0$  возникают заметные от-

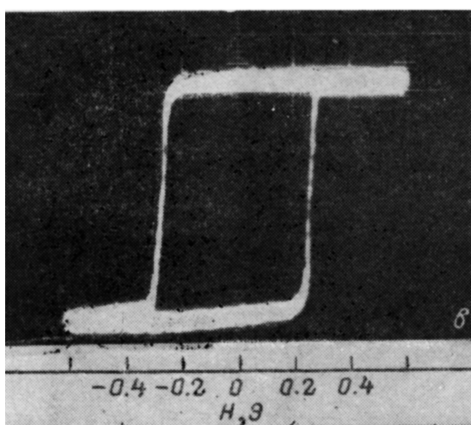
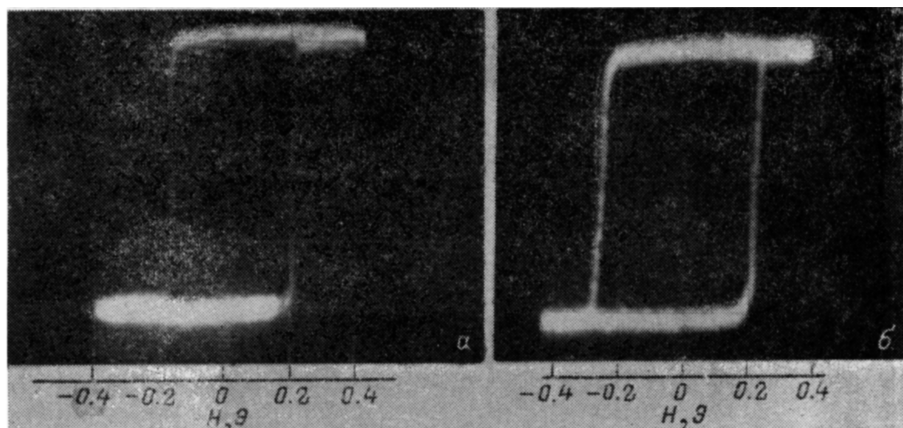


Рис. 3. Изменение формы петли гистерезиса аморфного сплава  $\text{Co}_{70}\text{Fe}_3\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$  в бистабильном состоянии.

$f$  (Гц),  $H_0$  (Э): *a* — 15, 0.36; *b* — 50, 0.36; *e* — 50, 0.55.

клонения крутых ветвей петли гистерезиса от вертикали (рис. 3, *b, e*). Это означает, что в области достаточно высоких  $f$  и  $H_0$  зависимость  $H_{cd}$  растет быстрее  $H_{sd}$ .

Мы измерили зависимости  $H_{cd}$  и  $H_{sd}$  от  $f$  и  $H_0$  при изменении перемагничивающего поля со временем в режиме треугольной пилы. В этом случае скорость изменения поля со временем

$$dH/dt = 4fH_0. \quad (1)$$

Результаты измерений представлены на рис. 4. По оси ординат отложены  $H_{sd}$  и  $H_{cd}$ , по оси абсцисс — значения величины  $\sqrt{fH_0}$ ; точки — экспериментальные значения  $H_{sd}$ , измеренные при различных частотах. Видно, что значения  $H_{sd}$ , измеренные при различных  $f$  и  $H_0$ , ложатся на одну прямую. Это означает, что динамическое поле старта  $H_{sd}$  в данном случае является функцией скорости изменения внешнего поля: значение  $H_{sd}$  зависит от величины произведения  $fH_0$  и не зависит от того, каковы значения сомножителей  $f$  и  $H_0$ . Вообще говоря, ниоткуда не сле-

дует, что это должно быть именно так. В качестве примера можно привести зависимость коэрцитивной силы  $H_{cd}$  аморфного сплава  $Fe_{82}B_{18}$  в исходном состоянии от  $dH/dt$  при высоких скоростях изменения поля (рис. 5). Видно, что в данном случае при одном и том же значении скорости изменения поля  $dH/dt$  можно получить сколь угодно много значений  $H_{cd}$

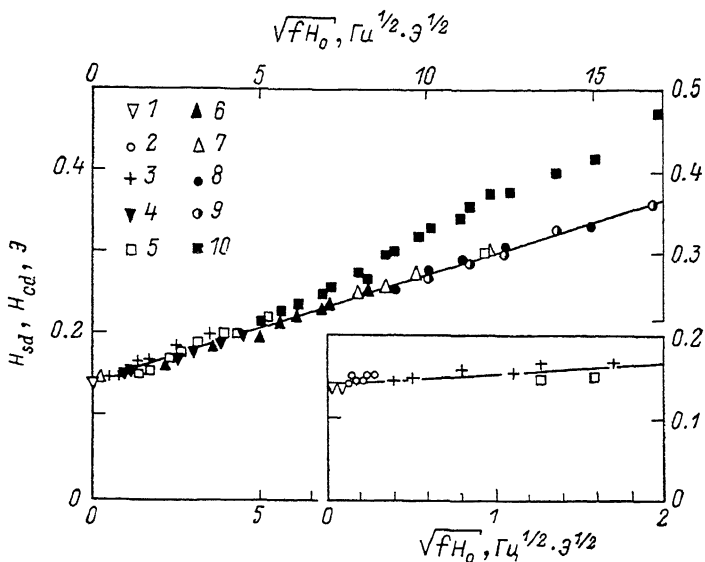


Рис. 4. Зависимость  $H_{sd}$  (1—9) и  $H_{cd}$  (10) от  $\sqrt{fH_0}$  аморфного сплава  $Co_{70}Fe_5Si_{10}B_{15}$  в бистабильном состоянии.

$f$ , Гц: 1 — 0.01, 2 — 0.1, 3 — 1.0, 4 — 5, 5 — 10, 6 — 25, 7 — 50, 8 — 80, 9 — 100.

в зависимости от того, при каких значениях частоты  $f$  и амплитуды  $H_0$  это значение  $dH/dt$  реализовано. Это означает, что динамическая коэрцитивная сила  $H_{cd}$  аморфного сплава  $Fe_{82}B_{18}$  в данном случае является функцией двух переменных  $f$  и  $H_0$  и не может быть представлена в виде функции скорости изменения поля  $dH/dt$ .

При рассмотрении причин появления бистабильного состояния в аморфном сплаве  $Co_{70}Fe_5Si_{10}B_{15}$  нами было обнаружено [3, 4], что в полях ниже поля старта в образцах существуют малые количества магнитной фазы с направлением намагниченности, противоположным результирующей намагниченности образца. Они существуют в виде краевых доменов и играют роль замороженных зародышей перемангничивания. Необратимый

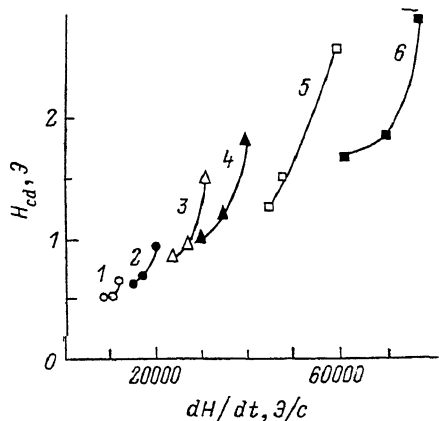


Рис. 5. Зависимость  $H_{cd}$  аморфного сплава  $Fe_{82}B_{18}$  в исходном состоянии от  $dH/dt$ .

$f$ , Гц: 1 — 18, 2 — 25, 3 — 40, 4 — 50, 5 — 75, 6 — 100.

рост зародышей перемангничивания в полях ниже  $H_s$  не происходит за счет процессов стабилизации границ доменов. Установленный нами экспериментально факт существования функциональной зависимости между полем старта и скоростью изменения перемангничивающего поля в бистабильных образцах  $Co_{70}Fe_5Si_{10}B_{15}$  может быть использован для описания движения доменной границы в потенциальном рельефе, обусловленном

стабилизацией границ доменов. Движение доменной границы в общем случае описывается следующим уравнением:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + L \frac{dx}{dt} + Kx = 2I_s H_i, \quad (2)$$

где  $L$  — коэффициент диссипации;  $K$  — коэффициент квазиупругой возвращающей силы;  $M$  — эффективная масса единицы поверхности доменной границы;  $x$  — смещение доменной границы;  $I_s$  — намагниченность насыщения на единицу объема;  $H_i$  — внутреннее поле, действующее на доменную границу.

Согласно [5], коэффициент диссипации уравнения (2) может быть представлен в виде суммы

$$L = L_e + L_r, \quad (3)$$

где  $L_e$  — коэффициент диссипации, обусловленный микротоками Фуко;  $L_r$  — коэффициент диссипации за счет релаксационных процессов.

В [5] экспериментально показано, что  $L_e$  на порядок превосходит величину  $L_r$  в интервале температур 25—230 °С в аморфных сплавах на основе Fe и Ni ( $L_e \sim 12.8$ ,  $L_r \sim 1.4$  кг/м<sup>2</sup>·с). Поэтому скорее всего причиной зависимости поля старта от скорости изменения внешнего поля являются микротоки Фуко.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Металлические стекла / Под ред. Дж. Дж. Гилмана, Х. Дж. Лими. М.: Металлургия, 1984. С. 290—293.
- [2] Hoselitz K. // J. Magn. and Magn. Mater. 1980. V. 20. P. 201—206.
- [3] Пономарев Б. К., Жуков А. П. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 10. С. 2974—2979.
- [4] Zhukov A. P., Indenbom M. V. // 4th Intern. conf. on Physics of Magnetic Materials. Programme and Abstracts, Warszawa, 1988. P. 177.
- [5] Aroca C., Lopez E., Sanchez O. // Phys. Rev. B. 1984. V. 30. N 7. P. 4024—4027.

Институт физики твердого тела АН СССР

Черноголовка  
Московская область

Поступило в Редакцию  
2 января 1989 г.