

тем атомных магнитных моментов и кристаллической решётки. В сильномагн. веществах  $M$ . достигает значит. величины (относит. удлинение  $\Delta l/l \sim 10^{-5} - 10^{-2}$ ). В диа- и парамагнетиках в большинстве случаев  $M$ . мала ( $10^{-7} - 10^{-5}$ ), но имеются исключения:  $Vi$  и редкоземельные парамагнетики, в  $K$ -рых она достигает  $10^{-4}$ . Существует ряд родственных  $M$ . явлений: спонтанная деформация решётки, или спонтанная  $M$ ., сопутствующая изменению магн. состояния вещества при нагреве (иногда её наз. термострикцией); часть упругой деформации магнитоэлектрич. природы, возникающей при действии механич. напряжений (механоэлектрич.); обратное по отношению к  $M$ . явление — изменение намагниченности магнетика при действии на него механич. напряжений (магнитоупругий эффект, или обратная  $M$ .).

В теории магнетизма рассматриваются разл. микроскопич. механизмы  $M$ .: за счёт изменения магн. диполь-дипольного взаимодействия, спин-орбитального взаимодействия, а также взаимодействия анизотропного электронного облака атома переходного элемента с внутрискристаллическим полем («одноионная»  $M$ .) и за счёт изменения обменных сил как между атомами, так и между электронами. В ферро- и ферримагнетиках в диапазоне значений магн. поля, где протекают процессы смещения доменных границ и вращения векторов  $M_s$  спонтанной намагниченности (см. Намагничивание), проявляется анизотропия  $M$ . — зависимость её величины и знака от направления в кристалле, при этом  $M$ . проявляется в изменении формы кристалла без изменения его объёма (линейная  $M$ .). Расчёты линейной  $M$ . в кристаллах осуществляются по феноменологич. ф-лам. Так, для расчёта  $M$ . ферро- и ферримагн. кристаллов кубич. симметрии, намагниченных до насыщения, применяется ф-ла

$$(\Delta l/l)_s = a_1 \sum_i (s_i^2 \beta_i^2 - 1/3) + 2a_2 \sum_{i \neq j} s_i s_j \beta_i \beta_j,$$

где  $s_i, s_j$  и  $\beta_i, \beta_j$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) — направляющие косинусы векторов  $M_s$  и направления измерения по отношению к рёбрам куба,  $a_1$  и  $a_2$  — константы анизотропии  $M$ ., численно равные:

$$a_1 = 3/2 (\Delta l/l)_{[100]}, \quad a_2 = 3/2 (\Delta l/l)_{[111]},$$

где  $(\Delta l/l)_{[100]}$  и  $(\Delta l/l)_{[111]}$  — макс. линейные  $M$ . соответственно вдоль ребра и пространства диагонали куба. Для ферро- и ферримагнетиков иной кристаллич. симметрии ф-лы для расчёта анизотропии  $M$ . носят более сложный характер. Путём усреднения по различным  $s_i, s_j, \beta_i$  и  $\beta_j$  может быть получена ф-ла для расчёта  $M$ . поликристаллич. образцов (при условии, что  $a_1$  и  $a_2$  одного знака и близки друг другу по величине). Так, для  $Ni$  и сплавов  $Fe - Ni$  применима ф-ла

$$(\Delta l/l)_s = 3/2 (\Delta l/l)_{[100]} (\cos^2 \nu - 1/3),$$

где  $\nu$  — угол между направлением напряжённости магн. поля  $H$  и направлением измерения линейной  $M$ . внутри поликристаллич. образца. Обычно  $M$ . измеряют вдоль направления  $H$  ( $\nu = 0$ ) и поперёк  $H$  ( $\nu = 90^\circ$ ), т. е. определяют значения продольной  $(\Delta l/l)_||$  и поперечной  $(\Delta l/l)_\perp$   $M$ . Для большинства ферромагнетиков они имеют разные знаки.

В области парапроцесса в кубич. ферромагнетиках  $M$ . проявляется в изменении объёма (объёмная  $M$ .), иногда её наз. обменной  $M$ ., поскольку она обусловлена изменением обменного взаимодействия и обычно велика вблизи Кюри точки. Здесь её зависимость от  $H$  может быть рассчитана по феноменологич. ф-лам, вытекающим из термодинамич. теории фазовых переходов Ландау или теории молекулярного поля. Вдали от точки Кюри для большинства ферромагнетиков  $M$ . парапроцесса мала. Однако в т. н. зонных ферромагнетиках (см. Зонный магнетизм) она очень велика, даже при

гелиевых темп-рах. Большая  $M$ . парапроцесса характерна для ферро- и ферримагнетиков при разрушении полем  $H$  существующих в них неколлинеарных магн. структур, т. к. при этом сильно изменяется обменная энергия.

$M$ . относится к т. н. чётным магн. эффектам, т. к. не изменяет своей величины и знака при изменении направления поля  $H$  (или вектора  $M_s$ ) на противоположное. В пьезомагнетиках (см. Пьезомагнетизм) наб-

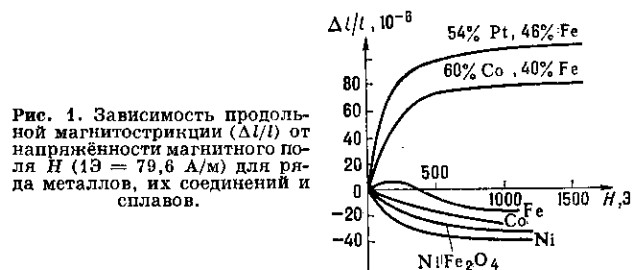


Рис. 1. Зависимость продольной магнитоэлектрики ( $\Delta l/l$ ) от напряжённости магнитного поля  $H$  ( $1 \text{ Э} = 79,6 \text{ А/м}$ ) для ряда металлов, их соединений и сплавов.

людается  $M$ ., линейная по магн. полю.  $M$ . исследована во многих поли- и монокристаллич. образцах ферро- и ферримагнетиков. У  $Fe$  (рис. 1) продольная  $M$ . в слабом магн. поле положительна (удлинение тела), а в более сильном поле отрицательна (укорочение). Для  $Ni$  при всех значениях поля продольная  $M$ . отрицательна. Большинство сплавов:  $Fe - Ni$ ,  $Fe - Co$ ,  $Fe - Pt$  и др. имеют положит. продольную  $M$ .:  $(\Delta l/l)_s \sim (10 - 100) \cdot 10^{-6}$ , в то же время в них поперечная  $M$ . отрицательна. Для сплавов  $Fe - Ni$  т. н. инварного состава (30—45%  $Ni$ ) при комнатных и даже низких темп-рах продольная и поперечная  $M$ . в полях  $H > H_s$  (область прозрачности) имеют одинаковые положит. знаки (рис. 2), здесь  $M$ . выражается в изменении объёма. Необычайно высоки  $M$ . у нек-рых редкоземельных ме-

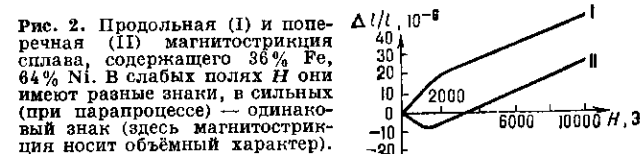


Рис. 2. Продольная (I) и поперечная (II) магнитоэлектрика сплава, содержащего 36%  $Fe$ , 64%  $Ni$ . В слабых полях  $H$  они имеют разные знаки, в сильных (при парапроцессе) — одинаковый знак (здесь магнитоэлектрика носит объёмный характер).

таллов, их сплавов и соединений: у  $Tb$  и  $Dy$ ,  $TbFe_2$  и  $DyFe_2$ , феррита-граната  $Tb_3Fe_5O_{12}$  и др. (т. н. гигантская  $M$ .). В табл. приведены данные о  $M$ . в полях магн. насыщения редкоземельных магнетиков и для сопоставления — значения  $M$ . для  $Fe$ ,  $Ni$  и  $Co$ .

Магнетик	$(\Delta l/l)_s, 10^{-6}$	Темп-ра измерения, К	Кристаллич. ось
$Tb$ . . . . .	1230	78	поликристалл
$Dy$ . . . . .	1400	78	поликристалл
$Tb$ . . . . .	5460	4, 2	$H    a$ — ось
$Tb$ . . . . .	22000	4, 2	$H    c$ — ось
$TbFe_2$ . . . . .	4700	300	$H    [111]$
$Tb_3Fe_5O_{12}$ . . . . .	2460	4, 2	$H    [111]$
$Fe$ . . . . .	-10	300	поликристалл
$Ni$ . . . . .	-37	300	поликристалл
$Ni$ . . . . .	-60	78	$H    [111]$
$Co$ . . . . .	-71	300	поликристалл

Гигантская  $M$ . обнаружена у ряда соединений урана ( $U_3As_4, U_3P_4$ ) и др. актинидов. Микроскопич. природа огромной  $M$ . редкоземельных и актинидных магнетиков связана с сильным взаимодействием пространственно-анизотропного облака  $f$ -электронов атомов с внутрискристаллич. полем.

Исследование  $M$ ., особенно в области техн. намагничивания, помогает в изысканиях новых магнитных