

НОВЫЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

К. П. Белов, Г. И. Катаев, С. А. Никитин, Г. Е. Чуприков

Открытие гигантской магнитострикции в редкоземельных (р.з.) металлах при низких температурах [1—3] и в интерметаллических соединениях редкой земли с железом при комнатной температуре [4, 5] выявило новый класс магнитострикционных материалов, обладающих стрикцией, в 30—40 раз превышающей стрикцию классических материалов на основе железа, никеля и кобальта. При этом замещение одного р.з.-металла (R) другим р.з.-металлом, а железа — кобальтом дает возможность значительно изменять магнитострикционные свойства в соединениях типа RFe_2 [6].

В настоящем сообщении приведены некоторые результаты исследования большой группы бинарных и псевдобинарных интерметаллических соединений с кубической структурой типа фазы Лавеса и с общей формулой $R_xTb_{1-x}Fe_2$; здесь R — р.з.-элементы Gd, Sm, Dy, Ho, а также Zr. Магнитострикция измерялась в статическом и импульсном полях и в динамическом режиме на частоте 50 гц. Перитектическая реакция при кристаллизации этих интерметаллидов не всегда дает возможность получить однофазные образцы требуемой структуры. Наши измерения проводились на составах, содержащих от 100 до 90% кубической фазы Лавеса. Образцы этих соединений весьма тверды и хрупки. Проводится работа по улучшению «технологичности» данных материалов.

На фигуре приведены кривые продольной (вдоль направления магнитного поля) $\lambda_{||}$ и поперечной λ_{\perp} (перпендикулярной полю) магнитострикции ряда образцов, измеренные методом проволочных тензометров в поле электромагнита, достигавшем 15 кэ при комнатной температуре. Тензометры наклеивались на образцы в виде дисков диаметром 6 и толщиной 2 мм. Кривые магнитострикции даны на фигуре для одного образца из каждой исследованной системы, кроме систем $Sm_xTb_{1-x}Fe_2$ и $Ho_xTb_{1-x}Fe_2$. Для соединения $TbFe_2$ в виде исключения приведены результаты, полученные на двух образцах (кривые 1 и 4), изготовленных различными способами. Эти результаты показывают, что как величина λ , так и наклон кривых, определяемый производной $d\lambda/dH$, существенно зависят от технологии выплавки и термообработки. Анализируя данные фигуры, можно установить следующие закономерности. Добавка гадолиния, обладающего намного меньшей анизотропией, чем тербий, понижает, очевидно, не только анизотропию соединения, но и магнитострикцию (кривая 2). Замещение четырехвалентным немагнитным цирконием трехвалентного магнитоактивного тербия в соединении $Zr_xTb_{1-x}Fe_2$ уменьшает концентрацию высокострикционных ионов тербия и увеличивает концентрацию электронов проводимости, экранирующих 4f-оболочки р.з.-ионов от действия кристаллического поля.

Зависимость продольной ($\lambda_{||}$) и поперечной (λ_{\perp}) магнитострикции от напряженности внешнего магнитного поля при комнатной температуре для следующих интерметаллических соединений: 1 — $TbFe_2$ (1); 2 — $Gd_{0,1}Tb_{0,9}Fe_2$; 3 — $Dy_{0,8}Tb_{0,4}Fe_2$; 4 — $TbFe_2$ (2); 5 — $Zr_{0,1}Tb_{0,9}Fe_2$; 6 — $Sm_{0,4}Gd_{0,6}Fe_2$

В результате стрикция при замещении тербия цирконием уменьшается (кривая 5). Вместе с тем добавление циркония увеличивает прочность и уменьшает окисляемость образцов.

По американским данным [7], при замещении тербия в $TbFe_2$ диспрозием или гольмием удается создать составы с минимумом анизотропии и соответственно повышенным значением $d\lambda/dH$ в полях 0—5 кэ. По нашим измерениям, в системе с диспрозием лучшим оказался состав с содержанием диспрозия $x=0,6$ (кривая 3 на фигуре; согласно данным [7], оптимальное значение $x=0,7$); в системе с гольмием лучшему составу соответствует значение $x=0,85$, как по нашим, так и по американским данным. Однако λ и $d\lambda/dH$ у этих составов оказались не лучше, чем у $TbFe_2$ (кривая 1).

У всех соединений, представленных на фигуре (кроме соединения, представленного кривой б), продольная магнитострикция в поле 15 кэ достигает гигантской величины порядка $1000 \cdot 10^{-6}$ (у никеля она равна $35 \cdot 10^{-6}$), что дает относительное удлинение около 1 мм на метр длины образца, причем в этом поле еще не наблюдается насыщения стрикции. Соединение $\text{Sm}_{0,4}\text{Gd}_{0,6}\text{Fe}_2$, где тербий «полностью замещен» другими р.з.-элементами, обладает большой отрицательной продольной магнитострикцией ($\lambda_{\parallel} \approx -400 \cdot 10^{-6}$ (кривая б), что также может представлять определенный практический интерес.

Уменьшение λ_{\parallel} при повышении температуры на 50° составляет вблизи комнатной температуры, например для TbFe_2 , около 7%. Модуль Юнга рассмотренных сплавов лежит в пределах $(0,8-1,3) \cdot 10^{12}$ дн/см² (у никеля он равен $2,1 \cdot 10^{12}$ дн/см²). Коэрцитивная сила составляет 100–300 э. Средняя магнитная проницаемость в полях до 5 кэ невелика и равна 2–3. Электросопротивление ρ составляет у исследованных сплавов при температуре 20°C около 100 мком·см, т. е. на порядок больше, чем у никеля; его температурный коэффициент равен: $\alpha = d\rho/dT \approx 0,2-0,3$ мком/град.

Полученные значения проницаемости и удельного сопротивления были использованы для расчета глубины проникновения d магнитного поля в образец при динамическом намагничивании. Для частоты 1000 гц получилось $d = 6,3$ см, что существенно больше возможного радиуса стержневого образца. Измерения магнитострикции в импульсных полях до 40 кэ и в переменном поле частоты 50 гц до 10 кэ (при регистрации кривых $\lambda(H)$ на экране осциллографа пьезодатчиком [8]) дали возможность проверить этот расчет. Ход кривых магнитострикции в импульсном поле практически не отличался от такового при статических измерениях, причем изменение скорости нарастания поля от 2,5 до 7,1 кэ/мс и изменение диаметра образцов в пределах нескольких миллиметров никак не повлияли на вид этих кривых. Петли гистерезиса магнитострикции в поле частоты 50 гц оказались достаточно узкими, хотя и немного шире, чем снятые по статической методике.

Все эти данные говорят о том, что в случае соединений типа RFe_2 мы имеем дело с перспективными материалами для мощных магнитострикционных преобразователей, работающих в режиме включений и выключений или в области звуковых частот, хотя возможность их использования на частоте резонанса еще подлежит изучению. При этом, естественно, техника питания подобных преобразователей весьма сильными токами будет кардинально отличаться от той, что применяется в настоящее время.

На объяснении гигантских значений магнитострикции в р.з.-соединениях с железом в данном кратком сообщении мы останавливаться не можем. Можно только указать, что оно основывается на так называемом одноионном механизме и развито в работах [9, 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. К. П. Белов, Р. З. Левитин, С. А. Никитин, А. В. Педько. Магнитные и магнитоупругие свойства диспрозия и гадолиния. ЖЭТФ, 1961, 40, 6, 1962–1969.
2. К. П. Белов, Р. З. Левитин, С. А. Никитин. Магнитоупругие свойства тербия и гольмия. Изв. АН СССР. Сер. физ., 1961, 25, 11, 1382–1387.
3. К. П. Белов, С. А. Никитин. Влияние геликоидальной магнитной структуры на магнитострикцию диспрозия. ЖЭТФ, 1962, 42, 2, 403–407.
4. N. Koon, A. Schindler, F. Carter. Giant magnetostriction in cubic rare earth-iron compounds of the type RFe_2 . Phys. Lett., 1971, 37A, 5, 413–414.
5. A. Clark, H. Belson. Giant room-temperature magnetostriction in TbFe_2 and DyFe_2 . Phys. Rev., 1972, 5B, 9, 3642–3644.
6. К. П. Белов, О. П. Елютин, Г. И. Катаев, Д. Ким, С. А. Никитин, Г. В. Пшеченкова, Л. И. Солнцева, Г. Н. Суровая, В. П. Таратынов. Магнитострикция интерметаллических соединений тербия с железом и кобальтом. Физ. металлов и металловедение, 1975, 39, 2, 284–288.
7. A. Clark, H. Belson, N. Tamagawa, E. Callen. Magnetic properties of rare earth — Fe_2 intermetallic compounds. Тр. междунар. конф. по магнетизму МКМ-73, М., «Наука», 1974, 4, 335–345.
8. Б. К. Пономарев, Р. З. Левитин. Измерение магнитострикции в сильных импульсных магнитных полях. Приборы и техника эксперимента, 1966, 3, 188–190.
9. E. Callen, H. Callen. Magnetostriction, forced magnetostriction and anomalous thermal expansion in ferromagnets. Phys. Rev., 1965, 139, 2A, 455–471.
10. К. П. Белов. Исследование новых магнитоупорядоченных веществ в Московском университете. Вестн. МГУ, 1967, 5, 23–31.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова,
физический факультет

Поступила
23 февраля 1976 г.