

К. П. БЕЛОВ

### О ВЛИЯНИИ РАСТЯЖЕНИЯ НА НАМАГНИЧЕНИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ В ОБЛАСТИ ПАРАПРОЦЕССА

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 18 VI 1948)

1. Влияние упругих деформаций на „техническое“ намагничение (область инверсии и вращения) изучалось многочисленными исследователями. Основные стороны явлений этого типа ясны как с экспериментальной, так и с теоретической точки зрения <sup>(1)</sup>.

Иначе обстоит дело с влиянием деформаций на намагниченность насыщения (область парапроцесса); этот вопрос почти совершенно не изучен. Между тем, такие исследования могли бы дать ценные сведения, необходимые для понимания природы ферромагнетизма.

Существующие немногочисленные экспериментальные работы <sup>(2)</sup> по изучению влияния гидростатического сжатия на намагничение, где указанный эффект может быть легче всего выявлен, дали противоречивые результаты, что, очевидно, связано с трудностями производства такого рода опытов. Что касается влияния односторонних упругих деформаций на намагничение в области парапроцесса, то имеется лишь одна и притом безуспешная экспериментальная попытка Шарф <sup>(3)</sup> обнаружить влияние растяжения на величину спонтанного намагничения никеля при температурах, близких к точке Кюри (где его легче наблюдать). Из этого было сделан поспешный вывод, что упругое растяжение вообще не влияет на величину спонтанного намагничения, а лишь вызывает его ориентацию <sup>(4)</sup>.

Однако последние заключения находятся в противоречии с существующими представлениями. Теория ферромагнетизма указывает, что обменное взаимодействие, ответственное за спонтанную ориентацию спинов, зависит от межуатомного расстояния. Это приводит к тому, что при всякой деформации ферромагнетика, вызывающей в какой-то мере изменение межуатомных расстояний, спонтанное намагничение также должно меняться.

Помимо того, они также не согласуются с результатами измерений магнитострикции. Известно, что эффекты, связанные с влиянием деформаций на намагничение, термодинамически „обратны“ магнитострикции. Измерения показали, что, кроме линейной магнитострикции, вызванной переориентацией доменов, в ферромагнетиках имеет место также линейная магнитострикция за счет парапроцесса <sup>(5)</sup>. Эта последняя и является косвенным подтверждением существования влияния растяжения на величину спонтанного намагничения.

Основываясь на указанных соображениях, мы сделали попытку исследовать влияние упругого растяжения на спонтанное намагничение ферромагнетиков. При этом мы применили более чувствительный метод измерения, чем использованный в работе <sup>(3)</sup>.

2. Поскольку основная трудность в такого рода исследованиях состоит в исключении мешающего действия „технического“ намагничивания, то все измерения мы стремились проводить вблизи точки Кюри, где это действие, естественно, может быть легче устранено наложением на исследуемый образец уже сравнительно небольшого магнитного поля. Сам же эффект изменения спонтанного намагничивания от растяжения здесь должен быть особенно заметным.

Метод измерения состоял в том, что определялось изменение намагниченности насыщения  $I_s$  ферромагнетика, помещенного в достаточно сильное и однородное магнитное поле  $H_s$  (заведомо большее, чем

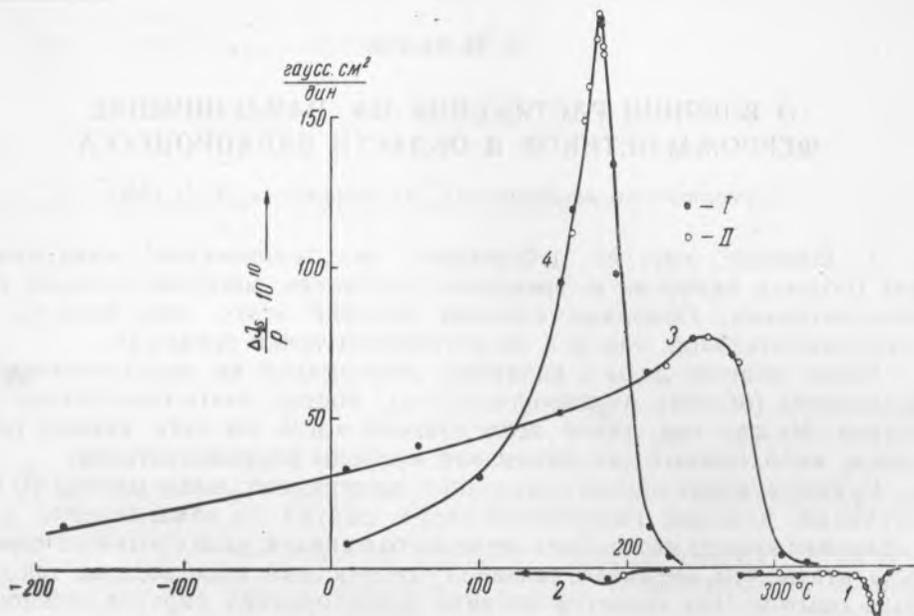


Рис. 1. Температурная зависимость эффекта изменения намагниченности насыщения при упругом растяжении ферромагнетиков. 1 — Ni, 2 — 80% Ni 20% Cu, 3 — 64% Fe 36% Ni, 4 — 44% Fe 56% Pt; I — при нагревании, II — при охлаждении

поле „технического“ насыщения), при быстром наложении на него или снятии упругого растяжения. Возникавшее при этом  $\Delta I_s$  фиксировалось с помощью системы чувствительных катушек, подключенных к баллистическому гальванометру. Испытуемые образцы брались в виде проволок диаметром 2 мм и длиной 250 мм. Быстрое растяжение осуществлялось нагрузкой  $p = 8-10$  кг/мм<sup>2</sup> путем приведения в действие специального рычажного устройства. Установка позволяла проводить измерения  $\Delta I_s$  при высоких и низких температурах.

Воспроизводимость данных измерений  $\Delta I_s$  как при нагревании, так и охлаждении была полная. Это говорило о том, что совместное действие температуры и деформации в металле не вызывало каких-либо пластических течений или превращений структурного характера. В противном случае на сцену неизбежно выступали бы необратимости в ходе кривых при нагревании и охлаждении. Подсчет показал, что поправки, вносимые в результаты измерений, на магнитный поток, возникающий за счет изменения сечения образца при растяжении, особенно малы вблизи точки Кюри и здесь смело могли быть опущены.

3. На рис. 1 приведены результаты измерений эффекта  $\Delta I_s$ , т. е. изменения  $I_s$  от растяжения  $p$  для чистого никеля и сплавов: 64% Fe 36% Ni; 44% Fe 56% Pt и 80% Ni 20% Cu при различных температурах (при  $H_s = 1000$  эрстед).

По оси ординат отложены значения  $\Delta I_c/p$ , т. е. величины эффектов, отнесенные к единице растягивающего напряжения  $p$  (в дин/см<sup>2</sup>).

Мы видим, что изменение намагниченности насыщения от растяжения у разных ферромагнетиков отличается не только по величине и знаку, но имеет весьма различную температурную зависимость. Большая величина  $\Delta I_s/p$  в сплавах 44% Fe 56% Pt и 64% Fe 36% Ni свидетельствует о чрезвычайно сильном влиянии изменения параметра решетки (вызванного растяжением) на парапроцесс, тогда как в Ni и сплаве 80% Ni 20% Cu оно весьма мало и может быть уверенно наблюдаемо только вблизи точки Кюри.

Эффект изменения намагниченности насыщения от упругой деформации термодинамически „обратен“ магнитострикции парапроцесса. Таким образом, из кривых рис. 1 мы можем оценить температурную зависимость последней. Это существенно, ибо определение ее непосредственными методами представляет значительные трудности.

4. Характер кривых рис. 1 можно понять из следующих качественных соображений. При каждой данной температуре и наложенном поле „технического“ насыщения  $H_s$ , т. е. когда все домены полностью ориентированы вдоль  $H_s$ , внутри последних всегда имеются электроны, магнитные моменты которых направлены антипараллельно результирующему моменту домена. Таких антипараллельных спинов тем больше, чем выше температура, и тем меньше, чем ниже она. Число этих спинов может меняться при наложении на ферромагнетик магнитного поля, увеличиваемого сверх  $H_s$  (парапроцесс), а также при приложении упругих деформаций. Действие последнего фактора состоит в том, что при деформации, вследствие изменения межузельного расстояния в решетке, меняется обменное взаимодействие, что, в свою очередь, приводит к изменению числа антипараллельных спинов, а следовательно, и намагниченности насыщения  $I_s$ . Здесь мы имеем дело с парапроцессом, вызванным деформацией решетки, причем этот парапроцесс, естественно, будет больше вблизи точки Кюри, где концентрация антипараллельных спинов наиболее высокая, и меньше при более низких температурах, где она мала. При очень низких температурах эффект  $\Delta I_s/p$ , вероятно, стремится к нулю, о чем и говорят приведенные на рис. 1 результаты измерений для сплава 64% Fe 36% Ni. Отрицательный знак эффекта у Ni и сплава 80% Ni 20% Cu необходимо объяснить тем, что в них обменное взаимодействие при увеличении межузельного расстояния (вызванного упругим растяжением) уменьшается, что, кстати говоря, должно привести к сдвигу точки Кюри в сторону низких температур.

Наоборот, результаты измерений сплавов: 44% Fe 56% Pt и 64% Fe 36% Ni показывают, что обменное взаимодействие при растяжении увеличивается, и точка Кюри сдвигается к более высоким температурам. Необычайно большая величина эффекта изменения намагниченности насыщения от растяжения, наблюдаемая в последних сплавах, повидимому, объясняется тем, что в них обменное взаимодействие в функции межузельного расстояния имеет весьма крутой ход, в то время как в Ni и в сплаве 80% Ni 20% Cu ход очень пологий.

Научно-исследовательский институт физики  
Московского государственного университета  
им. М. В. Ломоносова

Поступило  
22 IV 1948

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> Н. С. Акулов, Ферромагнетизм, 1939; R. Becker u. W. Döring, Ferromagnetismus, 1939. <sup>2</sup> Н. Nagaoka and K. Honda, Phil. Mag., 5, 46, 261 (1898); R. Steinberger, Physica, 4, 153 (1933); H. Ebert u. A. Kussmann, Phys. Z., 38, 437 (1937). <sup>3</sup> G. Scharff, Ann. Phys., 25, 223 (1936). <sup>4</sup> В. Герлах, Усп. физ. наук, 23, 368 (1940). <sup>5</sup> W. Döring, Z. Phys., 103, 560 (1936); К. Белов и О. Агасян, Изв. АН СССР, сер. физ., № 6, 494 (1947).