

Я. С. ШУР и В. И. ДРОЖЖИНА

**О ТЕМПЕРАТУРНОМ МАГНИТНОМ ГИСТЕРЕЗИСЕ
В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ**

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 25 XII 1946)

1. При одной и той же температуре и внешнем магнитном поле намагниченность ферромагнетика может быть различной в зависимости от его термической и магнитной предистории. Неоднозначная зависимость намагниченности от температуры при заданной величине внешнего магнитного поля может быть обусловлена двумя причинами: 1) различием в структуре кристаллической решетки и 2) различием в магнитной структуре. Вследствие этого кривая зависимости намагниченности от температуры (при постоянной величине внешнего магнитного поля), снятая при нагревании ферромагнетика, может не совпадать с такой же кривой, снятой при его охлаждении, и наоборот, что приводит к возникновению так называемого температурного магнитного гистерезиса.

В соответствии с двумя перечисленными причинами можно рассматривать температурный магнитный гистерезис двух видов. Первый вид гистерезиса подробно изучался на ряде сплавов и в особенности сплавов системы железо — никель (¹⁻²). Второй вид температурного магнитного гистерезиса, насколько нам известно, никем специально не изучался. Лишь в работах Ашворта (³), посвященных изучению безгистерезисных кривых намагничивания, в частности, получаемых путем охлаждения образцов железа и никеля из парамагнитного состояния до комнатной температуры в присутствии магнитного поля, попутно показано существование температурного магнитного гистерезиса второго вида.

Настоящая работа посвящена изучению на образцах никеля и кремнистого железа (4% Si) второго вида температурного магнитного гистерезиса с целью экспериментального исследования основных закономерностей этого явления и их объяснения на основе современной теории технической кривой намагничивания.

2. Все измерения производились при помощи вертикального аstaticкого магнитометра. При этом температура образца могла плавно изменяться от —195 до 400°.

Температурный магнитный гистерезис исследовался в двух вариантах:

Температурный цикл А. Образец в исходном состоянии имел наименьшую температуру данного цикла, затем включалось магнитное поле, образец плавно нагревался до наивысшей температуры и вновь охлаждался до исходного состояния.

Температурный цикл Б. В исходном состоянии образец имел наивысшую температуру данного цикла, затем включалось магнитное поле, образец медленно охлаждался до наименьшей температуры и вновь нагревался до исходного состояния.

Во время проведения любого температурного цикла образец намагничивался строго неизменным внешним магнитным полем заданной величины. Перед началом измерений исследуемый образец уже после установления исходного температурного состояния размагничивался, затем включалось магнитное поле, определялась исходная величина намагниченности образца и начиналось плавное изменение его температуры. Измерение намагниченности образца производилось при изменении его температуры на каждые 5–10°.

3. Основные результаты измерений следующие.

Кремнистое железо. На кривых рис. 1 приведены результаты измерений температурной зависимости намагниченности образца кремнистого железа при различных величинах внешнего магнитного поля: 0,006; 0,18; 3,00 и 9,00 эрстед (кривые с точками — по циклу А, с крестиками — по циклу Б).

Из рассмотрения кривых цикла А видно, что в области слабых

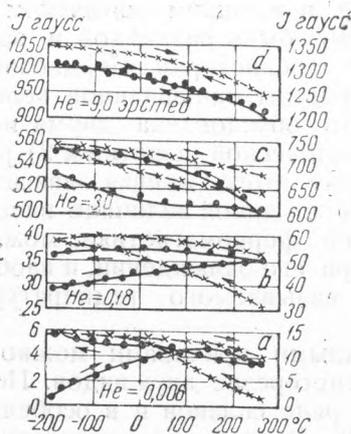


Рис. 1

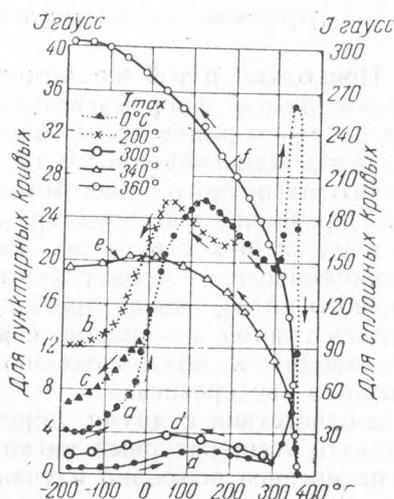


Рис. 2

полей (рис. 1, а) с ростом температуры намагниченность возрастает, достигает некоторого максимума и затем слегка снижается. При обратном ходе температуры нисходящая ветвь вначале идет ниже восходящей, пересекает ее, образуя петлю, и затем плавно повышается. По мере роста величины поля (рис. 1, б) максимум на восходящей ветви, а также петля исчезают, и величина намагниченности монотонно возрастает в течение всего цикла. Дальнейший рост магнитного поля (рис. 1, в) приводит к тому, что намагниченность на восходящей ветви снижается, а на нисходящей ветви она продолжает возрастать. Явление температурного магнитного гистерезиса, т. е. различие между восходящей и нисходящей ветвью, по мере роста поля уменьшается, и в полях порядка 9 эрстед исчезает (рис. 1, д).

Все кривые цикла Б, независимо от величины поля, подчиняются закономерности одного типа, а именно: при уменьшении температуры намагниченность монотонно возрастает, а при увеличении убывает. По мере роста величины магнитного поля гистерезис уменьшается и, так же как при цикле А, в полях 9 эрстед исчезает.

Никель. Исследование температурного магнитного гистерезиса никеля производилось при прохождении образцом температурного цикла А, причем минимальная температура при всех циклах оставалась равной -195° , а максимальная (T_{\max}) была различной: 0, 200, 300, 340 и 360° . Во время всех измерений величина магнитного поля

оставалась неизменной, равной 1,2 эрстеда. Кривая *a* на рис. 2 представляет собой общую для всех циклов температурную кривую намагничивания при подъеме температуры. Кривые *c*, *b*, *d*, *e* и *f* соответственно изображают собой обратные ветви циклов с различной максимальной температурой.

Из рис. 2 видно, что восходящая кривая (кривая *a*) имеет два максимума: около 120° и вблизи точки Кюри (так называемый гопкинсоновский максимум). Для циклов с максимальной температурой, лежащей ниже первого максимума, нисходящая ветвь проходит выше восходящей (кривая *c*). Если максимальная температура выше первого максимума, то нисходящая ветвь вначале идет ниже восходящей, затем пересекает ее, образуя петлю, и при дальнейшем снижении температуры проходит выше восходящей (кривая *b*). При сравнении нисходящих ветвей, представленных кривыми *d*, *e* и *f*, видно, что по мере приближения максимальной температуры к точке Кюри происходит очень резкое возрастание величины намагниченности.

Опыт показал, что при всех измерениях различных ферромагнетиков повторные температурные циклы, непрерывно следующие один за другим, снижают постепенно величину гистерезиса, и в конце концов получается однозначная кривая.

Сопоставление кривых температурного магнитного гистерезиса с обычными петлями гистерезиса, измеренными на исследуемых образцах, показало, что температурный магнитный гистерезис наблюдается в области тех же магнитных полей, что и обычный гистерезис. Это показывает, что температурный магнитный гистерезис возникает в области тех полей, где процессы намагничивания и перемагничивания ферромагнетиков осуществляются в основном путем необратимых смещений границ между доменами.

4. На основе современных представлений о характере процессов намагничивания можно следующим образом объяснить полученные нами экспериментальные результаты. При изменении температуры ферромагнетика его магнитная структура изменяется под действием двух факторов. Во-первых, величина спонтанной намагниченности уменьшается с ростом температуры ферромагнетика и увеличивается при его охлаждении, даже если при этом не происходит каких-либо процессов намагничивания. Во-вторых, происходит перемещение границ между доменами, вызванное следующими обстоятельствами. Как известно, границы между доменами устанавливаются в тех областях вещества, где граничная энергия доменов минимальна. Величина этой граничной энергии зависит от констант магнитной анизотропии и магнитострикции, а также от величины и характера распределения внутренних напряжений в материале. При изменении температуры изменяются как абсолютные значения констант анизотропии и магнитострикции, так и величина внутренних напряжений, что вызывает обратимые и необратимые смещения границ доменов. Последние и приводят к возникновению температурного магнитного гистерезиса.

Существенным в наших опытах является тот факт, что смещение границ доменов происходит всегда в присутствии внешнего магнитного поля. Вследствие этого при смещении границ должен осуществляться главным образом рост тех магнитных фаз, ориентация векторов намагниченности которых близка к направлению действующего магнитного поля. Такое течение процесса нарушается только в том случае, когда при изменении температуры возрастает энергия магнитной анизотропии.

В слабых магнитных полях (рис. 1, *a*), где намагничивание осуществляется при помощи процессов смещения, восходящие ветви показывают с ростом температуры сильное увеличение намагниченности. Это увеличение намагниченности вызвано уменьшением энер-

гии магнитной анизотропии с ростом температуры. Обратная ветвь (при понижении температуры) показывает гораздо более медленный рост намагниченности. Это объясняется тем, что в данном случае в исходном состоянии уже почти достигнута наиболее устойчивая доменная структура при данной величине внешнего магнитного поля, и поэтому при охлаждении на нисходящих ветвях проявляется в основном лишь обычное возрастание спонтанной намагниченности. По мере увеличения магнитного поля (рис. 1, *b, c*) уменьшается роль процессов смещения, что приводит к уменьшению относительного изменения намагниченности на восходящей ветви. Начиная с некоторых полей, имеет место только уменьшение намагниченности на восходящих ветвях, обусловленное обычным снижением намагниченности при повышении температуры. Нисходящие ветви проходят выше восходящих ветвей, что объясняется обычным ростом спонтанной намагниченности при охлаждении образца при относительно небольшом участии в намагничивании процессов смещения границ.

Аналогичная картина наблюдается и для температурных циклов А образцов никеля (рис. 2). В данном случае только некоторое усложнение вносит наличие первого максимума (при температуре около 120°) на общей восходящей ветви. Все нисходящие ветви (исключая кривую *b*, образующую петлю с кривой *a*, причина появления которой не совсем ясна) проходят выше восходящей ветви. При этом в зависимости от максимальной температуры цикла некоторые из нисходящих ветвей показывают уменьшение намагниченности (кривая *c*), на других намагниченность достигает максимума и затем убывает (кривые *d, e*) и, наконец, наблюдаются случаи, когда намагниченность только возрастает (кривая *f*). В данном случае (так же как и в случае кремнистого железа) нисходящие ветви проходят всегда выше восходящих ветвей по той причине, что при нагреве происходят необратимые смещения границ между доменами, которые приводят к увеличению намагниченности, сохраняющемуся при охлаждении образца. Уменьшение намагниченности с понижением температуры на нисходящих кривых обусловлено ростом энергии магнитной анизотропии. В случае, когда „поворотная“ точка цикла лежит при температурах, близких к точке Кюри, магнитное поле предотвращает образование доменной структуры, и поэтому намагниченность монотонно возрастает с понижением температуры (кривая *f* рис. 2). Наличие первого максимума на общей восходящей кривой, как правильно указал Кирхгам (⁴), можно объяснить тем, что константа магнитоstriction никеля уменьшается с ростом температуры и около 120° меняет знак.

В случае температурных циклов Б для образцов кремнистого железа нисходящие ветви при всех полях обнаруживают только рост намагниченности. В сильных полях это явление в основном связано с обычным ростом спонтанной намагниченности при незначительном участии в нем необратимых смещений границ. В слабых полях этот рост намагниченности происходит главным образом за счет необратимых смещений границ доменов. Все восходящие ветви циклов Б дают всегда снижение намагниченности, обусловленное в основном обычным уменьшением величины намагниченности с температурой, ибо все возможные необратимые процессы уже закончились на нисходящих ветвях этих циклов.

Институт физики металлов
Уральского филиала Академии Наук СССР

Поступило
16 X 1946

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ J. A. Ewing, Magnetic Induction in Iron and other Metals, London, 1894, p. 164. ² H. Kühlewein, Wiss. Veröff. Siemens — Konz., 11, 124 (1932). ³ J. R. Ashworth, Ferromagnetism, London, 1933. ⁴ Don Kirkham, Phys. Rev. 52, 1162 (1937).