

Я. С. ШУР и К. Б. ВЛАСОВ

ВЛИЯНИЕ СТАРЕНИЯ НА ВИД КРИВОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ В ДИНАМНОЙ СТАЛИ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 28 IX 1949)

1. Температурная зависимость коэрцитивной силы исследовалась в ряде ферромагнитных материалов (1). Однако исследований, ставящих перед собою задачу выяснения причин, могущих вызвать изменение вида температурной зависимости коэрцитивной силы, до сих пор специально не производилось. Выяснение же таких причин имеет большое как практическое, так и теоретическое значение.

В настоящей работе исследуется влияние процесса старения в динамной стали на температурную зависимость коэрцитивной силы. В данном случае под старением мы будем понимать изменение абсолютных значений коэрцитивной силы со временем при нагревании ферромагнетика до сравнительно невысоких температур (т. е. температур, при которых не происходит процессов рекристаллизации и процессы отжига еще не играют существенной роли). При этом мы не будем анализировать сущности физических процессов, вызывающих это явление (фазовый распад, распад пересыщенных растворов и т. п.).

Измерения производились на образцах динамной стали (Fe — Si с 1% Si) в форме полосок размерами $0,5 \times 2 \times 60$ мм³ на астатическом магнетометре. При этом исследуемый образец при высоких температурах находился в вакууме.

Старение в исследуемом образце происходило наиболее интенсивно, если образец предварительно нагревался на воздухе до температур 700—800° в течение нескольких десятков минут и затем быстро охлаждался. Во время такого отжига образец окислялся. Если обработанный таким образом образец нагревать в вакууме до температур выше 200°, сохраняя температуру неизменной, то наблюдается увеличение коэрцитивной силы со временем.

На рис. 1 представлены кривые температурной зависимости коэрцитивной силы, снятые на одном и том же образце. Кривая А была получена при сравнительно быстром проведении измерений (для снятия каждой точки температурная выдержка делалась не более 5 мин.). Следует при этом отметить, что температурные зависимости образца, стожженного в вакууме, и образца, отожженного на воздухе (окисленного) и быстро охлажденного, получились практически одинаковыми. При по-

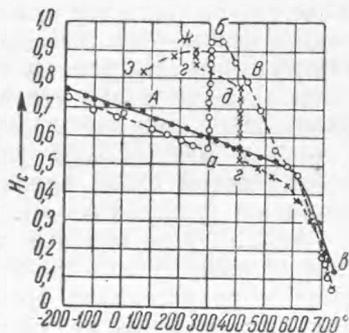


Рис. 1

следующем измерении при температуре 300° была произведена выдержка (кривая B); коэрцитивная сила начала при этом увеличиваться со временем. Так как измерения производились примерно через одинаковые промежутки времени (5—7 мин.), то расстояние между точками на участке a — b кривой позволяют судить о скорости возрастания коэрцитивной силы. Из рисунка видно, что эта скорость возрастания падает со временем. Было также установлено, что при температурах больше 300° , при достаточно больших выдержках, после завершения процесса возрастания коэрцитивной силы наступает процесс ее убывания со временем. Если затем этот образец нагреть до точки Кюри (участок b — v) и затем начать охлаждать (участок v — z), не делая при этом длительных выдержек, то кривая температурной зависимости коэрцитивной силы имеет тенденцию принять вид, характерный для исходного состояния. Однако, если при некоторой температуре (на данной кривой при 400°) снова сделать выдержку, то коэрцитивная сила начинает возрастать со временем (участок z — d). После этого образец был охлажден до температуры 250° , при которой сделана выдержка (участок e — $ж$), а затем до комнатной температуры (участок $ж$ — z). При этом следует отметить, что вид температурной зависимости коэрцитивной силы изменился (коэрцитивная сила уменьшается при уменьшении температуры).

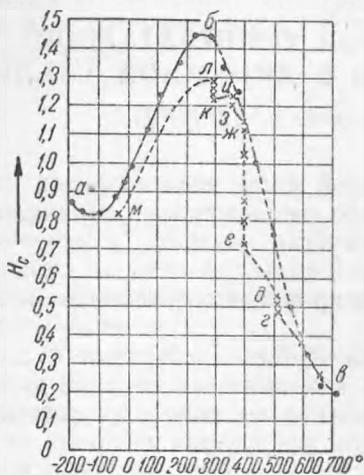


Рис. 2

Затем образец был нагрет до температуры порядка 250° и выдержан при этой температуре в течение одного часа. Температурная зависимость коэрцитивной силы приняла вид, представленный на рис. 2. При этом участок кривой a — b обратимый, т. е. температурная зависимость коэрцитивной силы получается одинаковой как для повышающейся, так и для понижающейся температуры. Нагрев до точки Кюри (участок b — v) и в этом случае снимает последствия старения, и только производя выдержки во время охлаждения при температурах 500° (участок z — d), 400° (e — $ж$), 370° (z — u) и 300° ($к$ — $л$), удалось получить температурную зависимость коэрцитивной силы, характерную для динамной стали, подвергнутой старению (участок $л$ — $м$).

Аналогичное явление изменения вида температурной зависимости коэрцитивной силы, происходящее в результате старения, наблюдалось и на монокристаллах трансформаторной стали, в которых также в результате старения коэрцитивная сила в интервале температур от -195 до 250° обратимо возрастает с увеличением температуры.

2. Явление изменения вида кривой температурной зависимости коэрцитивной силы, протекающее в результате старения, может быть качественно понято на основе современных представлений о природе коэрцитивной силы.

Примем, что в рекристаллизованных образцах кремнистого железа коэрцитивная сила определяется в основном неферромагнитными включениями. Тогда, по так называемой «теории включений», температурная зависимость коэрцитивной силы в основном определяется (при невысоких температурах, когда намагниченность насыщения меняется мало) температурной зависимостью константы естественной кристаллографической анизотропии K .

Температурная зависимость константы анизотропии у динамной ста-

ли никем не измерялась, но она, повидимому, близка к температурному ходу у чистого железа и трансформаторной стали. Как известно ⁽¹⁾, у этих материалов с ростом температуры K монотонно падает. Таким образом, следует ожидать, что и величина коэрцитивной силы будет также только убывать с ростом температуры. Этот вывод подтверждается экспериментально (рис. 1, кривая А).

Процесс старения, повидимому, приводит к возникновению больших внутренних напряжений, которые не могут рассасываться при сравнительно низкой температуре (300°). Эти напряжения и приводят к увеличению значений коэрцитивной силы. Такое объяснение подтверждается тем, что нагрев до температур более 500° приводит к снятию последствий старения, повидимому, в результате рассасывания напряжений, а также тем, что при выдержке при температурах выше 300° наблюдается сначала увеличение коэрцитивной силы, а затем некоторое снижение ее, обусловленное, повидимому, частичным снятием напряжений в результате отдыха. Поэтому при анализе температурного хода коэрцитивной силы следует рассматривать его с точки зрения так называемой «теории напряжений». Однако и с точки зрения «теории включений» напряжения могут существенно влиять как на величину, так и на температурную зависимость коэрцитивной силы благодаря тому, что анизотропия определяется также напряжениями, которые при $\lambda_s \sigma > K$ будут играть основную роль (λ_s — магнетострикция насыщения, σ — внутренние напряжения). Можно ожидать, что напряжения, возникшие в процессе старения в области температур ниже температуры начала отдыха, практически от температуры не зависят. Тогда как по «теории напряжений», так и по «теории включений» температурная зависимость коэрцитивной силы будет определяться в основном температурной зависимостью магнетострикции насыщения.

Известно, что для трансформаторной стали магнетострикция насыщения увеличивается с повышением температуры вплоть до 470° ⁽²⁾. В железе магнетострикция насыщения вдоль кристаллографического направления [100] имеет минимум, а затем растет до 500° *.

Отсюда следует, что, по крайней мере, до температур порядка 200 — 300° (когда кривая $H_c(t)$ обратима) коэрцитивная сила образца, подвергнутого старению, должна возрастать с повышением температуры, что согласуется с экспериментальными данными (рис. 2, участок а—б).

При больших температурах происходят необратимые процессы старения и отдыха, соотношения скорости протекания которых и определяют величину коэрцитивной силы при данной температуре в данный момент времени.

Институт физики металлов
Уральского филиала Академии наук СССР

Поступило
3 VIII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 С. В. Вонсовский и Я. С. Шур, Ферромагнетизм, ОГИЗ, 1948.
- 2 Д. А. Штуркин, Изв. АН СССР, сер. физ., 11, 661 (1947).

* Магнетострикция насыщения вдоль направления [111] уменьшается с ростом температуры, следовательно $\lambda_{[110]}$, превосходя по абсолютной величине $\lambda_{[111]}$, будет играть основную роль при температурах выше комнатных.