

Я. С. ШУР и Н. А. БАРАНОВА

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КРИВЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЕЛЬ ГИСТЕРЕЗИСА ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ СПЛАВОВ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 10 VII 1950)

До настоящего времени нет окончательно установившихся представлений о магнитной структуре высококоэрцитивных сплавов. Безуспешными оказались всякие попытки использования представлений о достаточно хорошо исследованной магнитной структуре мягких магнитных материалов для объяснения магнитных свойств высококоэрцитивных сплавов.

В предыдущих работах, посвященных исследованию магнитных ⁽¹⁾, магнетострикционных ⁽²⁾, электрических и гальваномагнитных ⁽³⁾ свойств магнитотекстурованных образцов высококоэрцитивных сплавов альнико и викаллой, мы высказали предположение о своеобразном характере магнитной структуры данного класса ферромагнетиков, резко отличной от таковой в мягких магнитных материалах. А именно: а) домены изолированы друг от друга неферромагнитными прослойками, вследствие чего процессы технического намагничивания осуществляются путем вращения векторов намагченности доменов, при отсутствии процессов смешения границ доменов; б) домены обладают резкой анизотропией формы, вследствие чего при отсутствии внешнего магнитного поля намагченность домена ориентирована вдоль направления с минимальным размагничивающим фактором; в) на ориентацию намагченности домена большое влияние оказывает магнитное взаимодействие доменов. Если изложенные представления о магнитной структуре высококоэрцитивных сплавов верны, то следует также ожидать отличной от наблюдаемой в мягких магнитных материалах зависимости магнитных свойств от температуры*.

К настоящему времени, насколько нам известно, не опубликовано исследований, посвященных изучению температурного хода кривых намагничивания и петель гистерезиса высококоэрцитивных сплавов. Можно лишь указать на следующие измерения, относящиеся к данному вопросу. При изучении температурной стабильности магнитных свойств сплава альни было показано ⁽⁶⁾, что в интервале температур от комнатной до 600° величина коэрцитивной силы остается неизменной, в то время как величина остаточной индукции с ростом температуры монотонно убывает. Согласно измерениям Н. В. Булгакова ⁽⁷⁾, проведенным на трех высококоэрцитивных сплавах в интервале температур от —195 до 400°, в сплавах альни и альнико независимо от условий обработки коэрцитивная сила и намагченность насыщения только убывают, в сплаве магнико после некоторых обработок (в том числе охлаждение в

* Следует отметить высказанное предположение о том, что причиной коэрцитивной силы в этих сплавах являются неоднородности интеграла обмена, возникающие благодаря наличию двух фаз с различными точками Кюри ⁽⁴⁾. Теоретический анализ показал, что, повидимому, неоднородности интеграла обмена не могут привести к предельно высоким значениям коэрцитивной силы, которые наблюдаются на опыте ⁽⁵⁾.

продольном поле) коэрцитивная сила с ростом температуры только возрастает.

Целью нашей работы являлось детальное изучение температурного хода кривых намагничивания и петель гистерезиса высококоэрцитивных сплавов альнико и викаллой в различном состоянии их магнитной текстурованности и анализ полученных результатов в свете ранее изложенной модели магнитной структуры этого класса ферромагнетиков, что должно уточнить наши представления о магнитной структуре высококоэрцитивных сплавов.

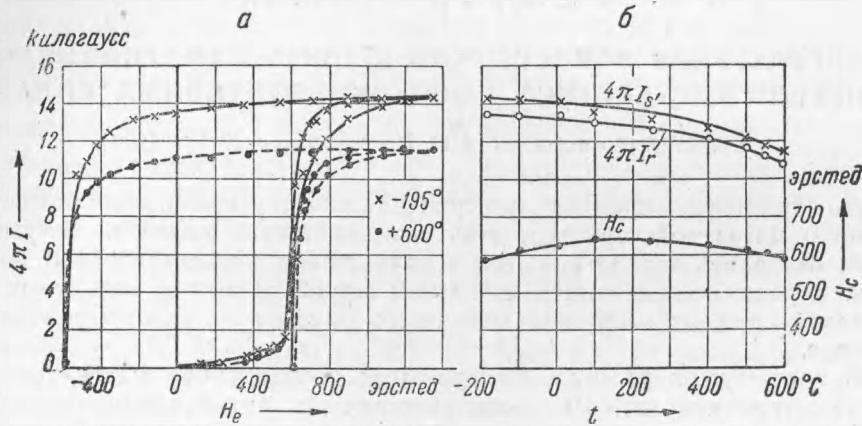


Рис. 1. *а* — кривые намагничивания и петли гистерезиса, *б* — температурная зависимость коэрцитивной силы, остаточной индукции и индукции при $H = 1400$ эрстед образца сплава альнико, прошедшего охлаждение в продольном магнитном поле

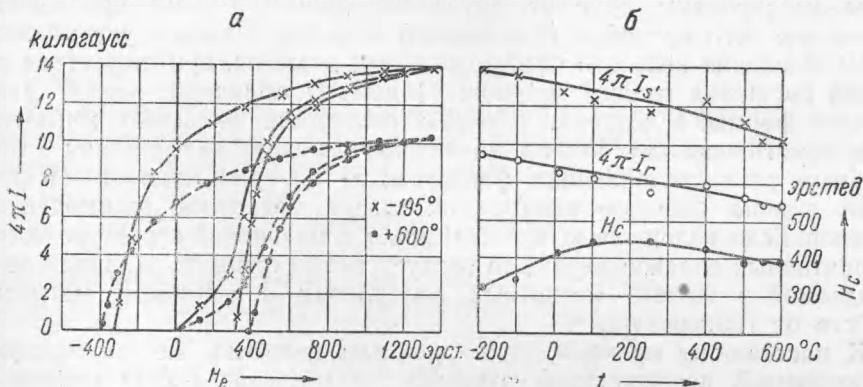


Рис. 2. Те же кривые, что и на рис. 1, для образца, прошедшего охлаждение без магнитного поля

Исследуемые образцы сплава альнико (51% Fe, 24% Co, 8% Ni, 3% Al) проходили следующую обработку: нагрев до 1300° и охлаждение с критической скоростью (обеспечивающей получение максимальных значений коэрцитивной силы) в присутствии поля, ориентируемого вдоль и поперек оси образца, и без наложения поля, а затем отпуск при 600° в течение нескольких часов.

Образцы сплава викаллой (52% Co, 38% Fe, 10% V) предварительно подвергались сильной холодной деформации в процессе волочения (95% обжатия) и далее проходили отпуск при 600° в течение 30 минут.

Со всех перечисленных образцов с помощью вертикального астатического магнетометра ⁽⁸⁾ снимались кривые намагничивания и петли гистерезиса при разных температурах в интервале от -195 до 600° через каждые 100—150°. Предварительные измерения показали, что нагрев

до 600° не производит каких-либо заметных структурных превращений, вызывающих необратимые изменения в магнитных свойствах.

Результаты измерений представлены на рис. 1—3, где приведены кривые намагничивания и петли гистерезиса при двух крайних температурах: -195 и 600° , а также температурная зависимость коэрцитивной силы H_c , остаточной индукции $4\pi I_r$, и индукции насыщения $4\pi I_s^*$ для образцов сплава альнико, охлаждаемых в различных условиях: в продольном (рис. 1) и поперечном (рис. 3) полях и в отсутствие поля (рис. 2).

Как видно из кривых рис. 1—3, ход кривых намагничивания и петель гистерезиса, снятых с образцов сплава альнико различной текстурой в широком диапазоне температур, качественно остаются неизменными. С ростом температуры индукции насыщения и остаточная

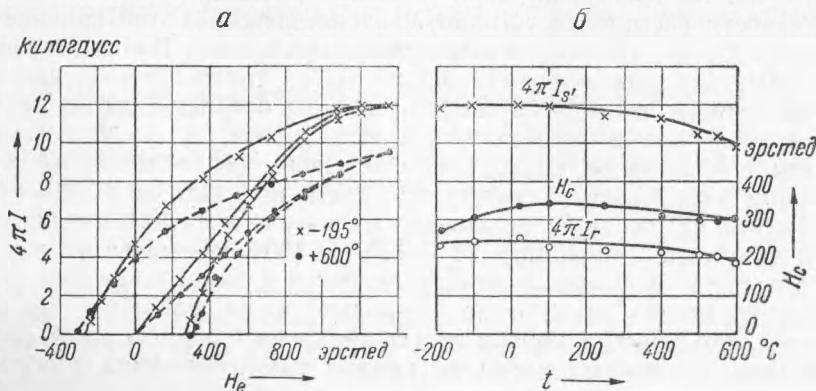


Рис. 3. Те же кривые, что и на рис. 1, для образца, прошедшего охлаждение в поперечном магнитном поле

монотонно убывают, а величина коэрцитивной силы обнаруживает более сложную зависимость: вначале возрастает, достигает максимума при 150 — 200° и затем медленно убывает, достигая при 600° почти той же величины, что и в исходном состоянии при -195° . Измерения образца сплава викаллой, который имеет такую же магнитную текстуру, как и образец сплава альнико, прошедший охлаждение в продольном поле⁽¹⁾, показали, что общий характер кривых намагничивания и петель гистерезиса и их температурная зависимость те же, что и для сплава альнико, прошедшего указанную термомагнитную обработку.

Как следует из многочисленных экспериментов в мягких магнитных материалах, основные магнитные параметры, характеризующие вид кривой намагничивания и петли гистерезиса: величина поля, при котором достигается максимальная проницаемость на кривой намагничивания, и величина коэрцитивной силы, только убывают с повышением температуры⁽⁵⁾. Это вызвано тем, что с повышением температуры облегчаются процессы смещения границ, которые в мягких ферромагнетиках определяют процессы технического намагничивания в слабых и средних полях.

Как видно из рис. 1—3, в исследованных нами высококоэрцитивных сплавах наблюдаются другого характера закономерности, а именно: рост температуры не вызывает монотонного сдвига крутого участка кривой намагничивания в область слабых полей и уменьшения величины коэрцитивной силы. Следовательно, температурная зависимость кривых намагничивания и петель гистерезиса резко отлична от таковой в мягких

* Величина $4\pi I_s'$ была определена при поле, равном 1400 эрстед. С дальнейшим повышением напряженности поля величина индукции возрастает, однако величины остаточной индукции и коэрцитивной силы уже при намагничающих полях выше 1000—1200 эрстед практически остаются неизменными⁽¹⁾.

магнитных материалах. Эти необычные закономерности находят свое объяснение, если учесть особенности магнитной структуры высококоэрцитивных сплавов. Так например, своеобразный температурный ход коэрцитивной силы может быть качественно объяснен, если принять, что благодаря особой магнитной структуре этих сплавов величина коэрцитивной силы должна зависеть от формы изолированных доменов и их магнитного взаимодействия. Если коэрцитивная сила такого изолированного домена зависит только от его формы, которая резко анизотропна, тогда $H_c \approx NI_s$, где N — размагничивающий коэффициент вдоль того направления в домене, в котором он наибольший, и I_s — намагниченность насыщения (5). При этом размагничивающий коэффициент будет зависеть как от формы домена, так и от магнитного взаимодействия доменов.

Рассмотрим, как должна изменяться с ростом температуры коэрцитивная сила. Во-первых, по мере увеличения температуры величина намагниченности насыщения убывает, следовательно, по этой причине должна также уменьшаться величина коэрцитивной силы. Во-вторых, уменьшение намагниченности насыщения вызывает также уменьшение величины магнитного взаимодействия, что в свою очередь должно привести к возрастанию размагничивающего коэффициента, а следовательно, и величины коэрцитивной силы. Таким образом, наблюденная чами температурная зависимость коэрцитивной силы находит свое объяснение, если принять, что основное влияние на изменение величины коэрцитивной силы в интервале температур от -195 до 150° оказывает вторая причина, а в области более высоких температур — первая причина. Таким же образом можно качественно объяснить и наблюдаемые на опыте сдвиги крутого участка кривой намагничивания с ростом температуры, если учесть, что первый излом на кривых намагничивания у образцов, охлажденных в продольном магнитном поле (рис. 1), происходит в поле, равном по величине коэрцитивной силе.

Институт физики металлов
Уральского филиала Академии наук СССР

Поступило
21 III 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Л. А. Шубина и Я. С. Шур, ЖТФ, **19**, 88 (1949). ² Д. А. Штуркин, и Я. С. Шур, ЖТФ, **19**, 235 (1949). ³ В. И. Дрожжина, М. Г. Лужинская и Я. С. Шур, ЖТФ, **19**, 95 (1949). ⁴ А. П. Комар и Д. М. Тарасов, ЖТФ, **10**, 1745 (1940). ⁵ С. В. Вонсовский и Я. С. Шур, Ферромагнетизм, М., 1948. ⁶ В. С. Меськин, Ферромагнитные сплавы, 1937, стр. 530. ⁷ Н. В. Булгаков, ДАН, **69**, 627 (1949). ⁸ Я. С. Шур и В. И. Дрожжина, ЖЭТФ, **17**, 607 (1947).