

Я. С. ШУР, Т. Д. ЗОТОВ и И. А. ЧЕБОТАРЕВ

## О ЗАВИСИМОСТИ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ОТ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ ПОРОШКОВ МЯГКИХ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 24 IX 1951)*

1. Как известно, при переходе к тонким порошкам величина коэрцитивной силы возрастает; чем тоньше порошок, тем относительно резче проявляется этот рост<sup>(1)</sup>. Физическая природа явления до сих пор не выяснена. Повидимому, для понимания его прежде всего необходимо произвести изучение на порошках различной дисперсности влияния таких воздействий, которые в сплошных массивных ферромагнетиках заметным образом влияют на величину коэрцитивной силы  $H_c$ . Именно в таком плане и проводилось настоящее исследование.

По современным представлениям, в обычных мягких магнитных материалах величина  $H_c$  зависит от значений констант магнитной анизотропии и магнетострикции<sup>(1)</sup>. Для того чтобы выделить в чистом виде эффект, вызванный размером порошинок, необходимо проводить исследование такого ферромагнетика, у которого значения упомянутых констант близки к нулю. Такими свойствами обладает сплав альсифер<sup>(2)</sup>, выбранный нами для настоящего исследования.

Целью данной работы является установление на образцах из сплава альсифер: зависимости коэрцитивной силы от размеров порошинок и влияния напряжений и температуры на этот эффект.

2. Исследованию были подвергнуты порошки сплава альсифер состава: 9,4% Si, 5,3% Al, остальное Fe. Порошки получились путем механического дробления; их разделение на отдельные фракции, состоящие из порошинок одинакового среднего диаметра, производилось сперва путем просева через сита (до 50  $\mu$ ) и далее развейиванием в специальном приборе. Крупность частиц отдельных образцов, характеризуемая средним диаметром порошинок, варьировалась от 2,5 мм до 3  $\mu$ . Размеры частиц определялись с помощью микроскопа.

Измерение  $H_c$  порошков производилось на образцах двух типов: имевших сильный наклеп, полученный при дроблении, и прошедших высокотемпературный отжиг (1000°, выдержка один час) в высоком вакууме. С целью сохранения одинаковых условий отжига все исследованные порошки проходили этот отжиг одновременно.

Температурная зависимость  $H_c$  изучалась в интервале температур от -195 до 300°. Все измерения проводились на вертикальном астатическом магнетометре.

3. Основные результаты измерений представлены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 приведены кривые зависимости  $H_c$  от размеров порошинок для двух серий образцов: до отжига (а) и прошедших высокотемпературный отжиг (б).

Как видно из кривой *a*,  $H_c$  порошков, начиная с диаметра частиц ниже 1,5 мм, с уменьшением размеров порошинок только возрастает. При этом до 50  $\mu$  наблюдается почти линейный рост  $H_c$ ; ниже этих размеров — чем мельче порошинки, тем относительно резче возрастает величина  $H_c$ .

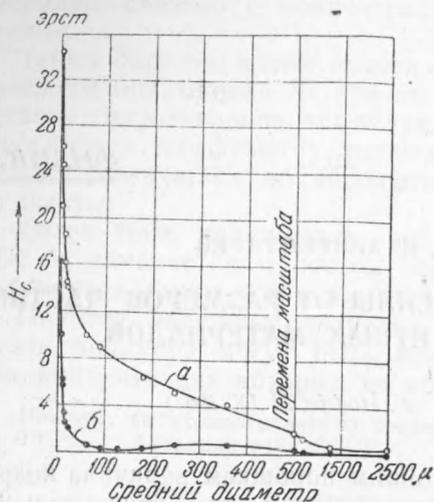


Рис. 1. *a* — кривая неотожженных порошков, *b* — кривая отоженных порошков в вакууме при 1000° в течение 1 часа

Из кривой *b* следует, что у порошков, прошедших отжиг,  $H_c$  остается почти постоянным до порошинок диаметром 50  $\mu$ . При меньших размерах порошинок наблюдается резкое возрастание  $H_c$ .

Из кривых рис. 1 видно, что, независимо от условий обработки образцов, при диаметре частиц порошка ниже 50  $\mu$  наступает резкое возрастание  $H_c$ .

На рис. 2 приведены температурные кривые  $H_c$ , снятые с образцов различной крупности частиц: кривые I — VII относятся к сплошному образцу (I) и порошкам со средним диаметром частиц 360 (II), 90 (III), 60 (IV), 22 (V), 12 (VI), 6 (VII)  $\mu$ .

Из этих кривых видно, что у сплошного образца и у образцов с диаметром частиц 360, 90 и 60  $\mu$  при повышении температуры от  $-195$  до  $20^\circ$  наблюдается понижение  $H_c$ ; при дальнейшем возрастании температуры  $H_c$  начинает возрастать. Таким образом, у этих кривых имеется резко выраженный минимум при  $20^\circ$ .

У образца со средним диаметром частиц 22  $\mu$  (V) минимум исчезает, при этом  $H_c$  во всем интервале температур монотонно убывает с ростом температуры, оставаясь постоянным лишь в температурном интервале от 50 до  $170^\circ$ .

У образцов с диаметром порошинок 12 и 6  $\mu$   $H_c$  с ростом температуры только понижается.

4. Как видно из рис. 1, начиная со средних размеров частиц 50  $\mu$  и ниже,  $H_c$  резко возрастает. Это возрастание  $H_c$  никак не связано с теми магнитными константами (анизотропии и магнетострикции), которые определяют величину  $H_c$  в обычных массивных ферромагнетиках. Монотонный рост  $H_c$ , который наблюдается на кривой *a* для порошинок диаметром от 1,5 мм до 50  $\mu$ , вызван ростом величины внутренних напряжений в материале; при этом чем мельче частицы, тем выше среднее значение внутренних напряжений, созданных дроблением, а следовательно, и выше значение  $H_c$ . При более тонких порошках рост  $H_c$  определяется, главным образом, не этими напряжениями, а другой причиной, связанной с малостью размеров частиц.

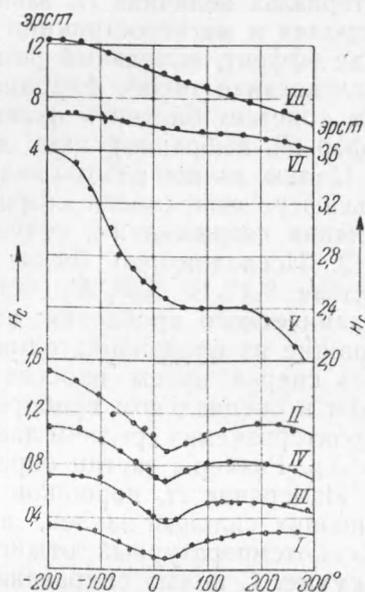


Рис. 2

Этот вывод подтверждается также кривыми температурного хода  $H_c$ , представленными на рис. 2. Наблюдаемый на кривых I—IV минимум  $H_c$  вызван тем, что при температуре  $20^\circ$  константы анизотропии и магнетострикции проходят через нулевые значения<sup>(2)</sup>. При более высоких температурах, а также при более низких, повидимому, эти константы (суммарная магнитная анизотропия) по абсолютной величине имеют большее значение<sup>(3)</sup>. Таким образом, в данном случае величина  $H_c$  определяется суммарным значением магнитной анизотропии. При переходе к более мелким частицам (кривые V—VII) этот минимум исчезает, что указывает на появление нового фактора, определяющего величину  $H_c$ , действие которого немного превышает суммарную магнитную анизотропию\*.

Таким образом, на основании этих измерений можно предположить, что при переходе к мелким частицам особым образом видоизменяется сама магнитная структура ферромагнетика, вследствие чего в этих частицах своеобразно протекают процессы технического намагничивания.

Повидимому, этот же физический механизм, определяющий рост  $H_c$  у тонких магнитных порошков, в некоторых случаях приводит к высоким значениям  $H_c$  и в массивных ферромагнетиках, а именно в случае высококоэрцитивных сплавов. В этих сплавах имеются мелкодисперсные ферромагнитные образования, изолированные друг от друга неферромагнитными (или слабомагнитными) прослойками. Следовательно, в рассматриваемых сплавах может иметь место такая же магнитная структура, как и в тонких порошинках, и поэтому в них процессы технического намагничивания должны протекать таким же образом, как и в мелких частицах.

Институт физики металлов  
Уральского филиала Академии наук СССР

Поступило  
30 VI 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> С. В. Вонсовский и Я. С. Шур, Ферромагнетизм, М., 1948. <sup>2</sup> А. С. Займовский и Я. П. Селицкий, Сборн. тр. по технич. физике, 1948, стр. 5.  
<sup>3</sup> А. С. Займовский, Бюлл. ВЭИ, 2, 1 (1941).

\* Суммарная магнитная анизотропия, вызванная как естественной кристаллографической анизотропией, так и анизотропией напряжений, выражается следующим образом:  $aK + b\lambda_s\sigma$ , где  $K$  — константа магнитной анизотропии,  $\lambda_s$  — магнетострикция насыщения,  $\sigma$  — напряжение,  $a$  и  $b$  — постоянные порядка единицы<sup>(1)</sup>.