

Я. С. ШУР и К. Б. ВЛАСОВ

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 12 X 1949)

1. Изучение температурной зависимости коэрцитивной силы, принципиально позволяя разделить влияние различных факторов, ее определяющих, имеет существенное значение для развития теории коэрцитивной силы. Однако вопрос несколько усложняется в том случае, когда можно ожидать, что коэрцитивная сила в основном определяется внутренними упругими напряжениями, ибо о температурной зависимости последних в реальных материалах практически ничего не известно. Создавая искусственно внутренние напряжения и исследуя их влияние на характер температурной зависимости коэрцитивной силы, мы можем до некоторой степени обойти это затруднение.

Имеющиеся в настоящее время немногочисленные исследования температурной зависимости коэрцитивной силы⁽¹⁾ приводят зачастую к несколько отличающимся друг от друга результатам. Это вызвано тем, что до сих пор не ставилась экспериментальная задача выяснения причин изменения характера температурной зависимости коэрцитивной силы.

Данная работа посвящена исследованию влияния наклепа на характер температурной зависимости коэрцитивной силы образцов железа, динамной и трансформаторной стали, никеля и молибденистого пермаллоя. Выбор материалов определялся, главным образом, тем, что только в железе, трансформаторной стали и никеле известны температурные зависимости ферромагнитных констант, определяющих величину коэрцитивной силы. Образцы перед деформацией (прокатка или протяжка) проходили высокотемпературный отжиг в вакууме. Измерения производились на астатическом магнетометре, образец во время измерений находился в вакууме.

2. Результаты измерений приведены на рис. 1—3, где коэрцитивная сила с целью большей наглядности представлена в относительных единицах H_{ct}/H_{c20} . Величины H_{ct} и H_{c20} , соответственно, отно-

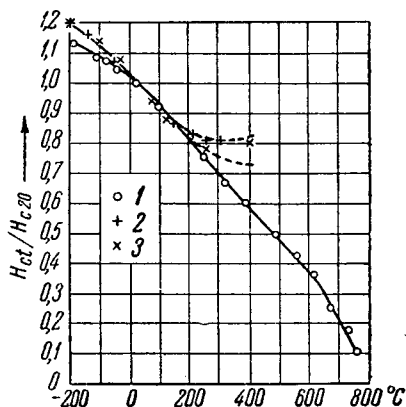


Рис. 1. Температурная зависимость коэрцитивной силы, выраженной в относительных единицах, в железе: 1 — без наклепа ($H_{c20} = 0,97$ эрст.), 2 — деформация 44% ($H_{c20} = 2,75$ эрст.), 3 — деформация 75% ($H_{c20} = 3,42$ эрст.)

ются к коэрцитивной силе при произвольной температуре и при комнатной температуре. На рис. 1 представлены зависимости H_{ct}/H_{c20} для образцов железа, имеющих различную степень деформации. Для динамной стали наблюдалась подобная же картина. Зависимости H_{ct}/H_{c20} для образцов трансформаторной стали, имеющих различную степень деформации, представлены на рис. 2. Надо заметить, что для этих материалов при данных величинах деформации температурные зависимости коэрцитивной силы получались обратимыми лишь до температур 250—300°, выше этих температур наблюдалось резкое уменьшение коэрцитивной силы со временем, обусловленное явлением „отдыха“.

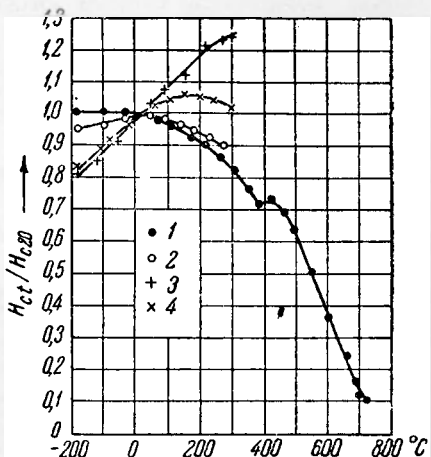


Рис. 2. Температурная зависимость коэрцитивной силы, выраженной в относительных единицах, в трансформаторной стали: 1 — без наклепа ($H_{c20} = 0,5$ эрст.), 2 — деформация 8% ($H_{c20} = 0,85$ эрст.), 3 — деформация 17% ($H_{c20} = 1,46$ эрст.), 4 — деформация 55% ($H_{c20} = 2,88$ эрст.)

Из приведенных рисунков видно, что имеется некоторая критическая величина деформации, после достижения которой происходит уменьшение относительных значений коэрцитивной силы при температурах выше комнатных. Интересно попутно отметить, что на кривой температурной зависимости коэрцитивной силы в отожженной трансформаторной стали в районе 380° имеется относительный минимум.

Ввиду того что магнитные свойства никеля очень чувствительны к деформациям, более удобным оказалось характеризовать его свойства не степенью обжатия, а температурой и временем отжига предварительно наклепанных образцов. Из одной проволоки, подвергнутой протяжке, было изготовлено четыре образца, прошедших различный отжиг в вакууме.

На рис. 3 представлены температурные зависимости коэрцитивной силы, выраженной в относительных единицах, таким образом обработанных образцов. Температурные зависимости коэрцитивной силы для никеля получались обратимыми во всем интервале температур от -195° до точки Кюри (360°) при всех деформациях.

Действие наклепа на характер температурной зависимости коэрцитивной силы в молибденистом пермаллоэ примерно такое же, как и у никеля. Отожженный в вакууме при 1000° в течение 1 часа образец молибденистого пермаллоэ обладал при комнатной температуре коэрцитивной силой, равной 0,02 эрстед, имел температурный

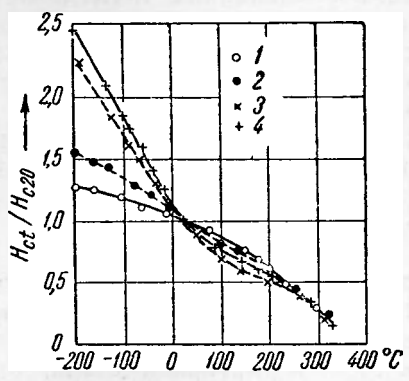


Рис. 3. Температурная зависимость коэрцитивной силы, выраженной в относительных единицах, в никеле: 1 — образец, подвергнутый наклепу ($H_{c20} = 21,8$ эрст.), 2 — образец отожжен при 700° в течение 25 мин. ($H_{c20} = 6,6$ эрст.), 3 — образец отожжен при 700° в течение 1 часа 20 мин. ($H_{c20} = 2,0$ эрст.), 4 — образец отожжен при 1100° в течение 30 мин. ($H_{c20} = 1,38$ эрст.)

ход коэрцитивной силы, подобный изображенному на рис. 3 кривой 4. После деформации (обжатие

в 20%) образец имел при комнатной температуре коэрцитивную силу, равную 0,95 эрстед, и ее температурная зависимость приняла вид, подобный кривой I на рис. 3.

3. Данные измерения показали, что на характер температурной зависимости коэрцитивной силы существенное влияние оказывают внутренние напряжения. Отсюда делаются более понятными расхождения в результатах измерений на одних и тех же материалах различных авторов. В частности, наблюдавшееся Герлахом⁽²⁾ изменение характера температурной зависимости коэрцитивной силы в порошках никеля в зависимости от температуры отжига также, повидимому, следует связывать не только с плотностью спеченного образца, как делал Герлах, а со снятием напряжений по мере увеличения температуры отжига.

Согласно современной теории коэрцитивной силы⁽¹⁾, легко показать, что температурная зависимость коэрцитивной силы, выраженной в относительных единицах, по так называемым „теории напряжений“ и „теории включений“, при больших внутренних напряжениях ($\lambda_s \sigma_i \gg K$) имеет следующий вид:

$$\frac{H_{ct}}{H_{c20}} = \frac{\sqrt{\lambda_{st} \sigma_{it} / \lambda_{s20} \sigma_{i20}}}{I_{st} / I_{s20}}, \quad \delta \ll (или d);$$

$$\frac{H_{ct}}{H_{c20}} = \frac{(\lambda_{st} \sigma_{it} / \lambda_{s20} \sigma_{i20})^{1/2}}{I_{st} / I_{s20}}, \quad \delta \gg l (или d),$$

где λ_{st} — магнетострикция насыщения, σ_{it} — внутренние напряжения и I_{st} — намагниченность насыщения при некоторой температуре t ; λ_{s20} , σ_{i20} , I_{s20} — то же при комнатной температуре; K — константа кристаллографической анизотропии; δ — толщина границы между доменами; d — диаметр включений и l — длина волны внутренних напряжений.

Можно положить, что $\sigma_i = E \Delta l_i$, где E — модель Юнга и Δl_i — внутренние упругие деформации, вызванные наклепом. В первом приближении Δl_i будем считать независимыми от температуры. Тогда, принимая во внимание, что в интервале температур от -195 до 200° I_s и E слабо зависят от температуры, можно ожидать, что температурная зависимость коэрцитивной силы определяется температурной зависимостью магнетострикции насыщения. Опыт такое предположение подтверждает.

В трансформаторной стали магнетострикция насыщения повышается с температурой вплоть до 470° ⁽³⁾ и коэрцитивная сила в наклепанном образце повышается. В железе магнетострикция вдоль направления $[100]$ с ростом температуры сначала понижается, при 100° достигает минимума, а затем растет до 500° ; в соответствии с этим в наклепанном образце железа относительные значения коэрцитивной силы при температурах выше 100° больше, чем в наклепанном. В никеле мы имеем обратную картину; в нем магнетострикция насыщения монотонно уменьшается с температурой; константа анизотропии при температурах от -195° до комнатных уменьшается в 10 раз, при 130° проходит через нуль, меняет знак и остается по абсолютному значению малой величиной. В соответствии с этим в наклепанном образце никеля коэрцитивная сила плавно уменьшается с ростом температуры, а в хорошо отожженном образце она резко уменьшается при изменении температуры от -195 до $+100^\circ$ (в 3,5 раза).

Существование критической величины деформации наводит нас на мысль, что пластические деформации могут приводить к изменению величины и, возможно, температурной зависимости магнетострикционных констант. Наличие минимума на кривой I рис. 2 при темпера-

туре 380° , повидимому, вызвано тем обстоятельством, что в области этой температуры константа анизотропии K_1 становится малой величиной, а константа анизотропии K_2 меняет знак и возрастает по абсолютной величине (4).

Институт физики металлов
Уральского филиала
Академии наук СССР

Поступило
3 VIII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ С. В. Вонсовский и Я. С. Шур, Ферромагнетизм, 1948. ² W. G. Ferlach, Metallforschung, 2, 275 (1947). ³ Д. А. Штуркин, Изв. АН СССР, сер. физ., 11, 661 (1947). ⁴ Л. А. Шубина, ДАН, 57, № 5 (1947).