

Н. БУЛГАКОВ и Е. КОНДОРСКИЙ

**МАГНИТНАЯ ВЯЗКОСТЬ И РОЛЬ СМЕЩЕНИЯ ГРАНИЦ МЕЖДУ  
ДОМЕНАМИ В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ  
ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ СПЛАВОВ**

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 26 IX 1949)

В процессе исследования высококоэрцитивных сплавов была измерена их магнитная вязкость, проявляющаяся в запаздывании момента установления намагниченности образца в данном поле по отношению к моменту установления этого поля. Измерению подвергался сплав № 1 (Ni 24%, Al 12%, Cu 1,5%, Fe остальное) после различных термообработок, приводящих к различным степеням распада твердого раствора, и сплав № 2 (Ni 13%, Al 8%, Cu 3%, Co 24%, Fe остальное), охлаждавшийся в магнитном поле и также представленный образцами с различной степенью распада твердого раствора. Измерения производились при различных температурах и заключались в том, что спустя время  $t$  после момента включения или изменения поля в баллистическую катушку образца включался прибор, регистрировавший изменение намагниченности образца, обусловленное вязкостью; время  $t$  изменялось в пределах от  $2 \cdot 10^{-3}$  до 81 сек. При работе с  $t \leq 15 \cdot 10^{-3}$  сек. был использован маятник-прерыватель типа Гельмгольца\* с баллистическим гальванометром и измерения производились по методу, неоднократно описанному в литературе<sup>(1,2)</sup>, а при работе с  $t \geq 0,1$  сек. был использован флюксметр, и его включение осуществлялось от руки.

Измерения вязкости производились как на нисходящей ветви петли гистерезиса, так и на начальной кривой намагничивания; в последнем случае перед наложением поля образец тщательно размагничивался с помощью коммутирования постоянного тока и выдерживался в течение 5 мин. в этом размагниченном состоянии. Влияние вихревых токов в образцах, рассчитанное по их проницаемости, электрическому сопротивлению и поперечным размерам, а также влияние самоиндукции катушки было ничтожным (20 — 50 мсек.).

На рис. 1 показаны результаты измерения магнитной вязкости сплава № 2. Предварительно намагниченный до насыщения образец помещался в отрицательно направленное поле —  $H$  заданной величины, затем выключением вспомогательной катушки это поле —  $H$  увеличи-

\* Авторы выражают благодарность Р. В. Телеснину, любезно разрешившему провести измерения вязкости при  $t \leq 15 \cdot 10^{-3}$  на сконструированном им маятнике-прерывателе.

валось на величину  $\Delta H$  и через промежуток времени  $t$  в измерительную катушку, навитую на образец, включался баллистический гальванометр.

Аналогично измеренный образец сплава № 1 показал (график здесь не приводится) меньшую магнитную вязкость: через 23 сек. величина  $\Delta I$  при оптимальной величине поля  $-H$  обращается в нуль. Эти измерения производились при комнатной температуре.

Рис. 2, а и б передает прирост величины намагничённости образца из сплава № 1 при включении флюксметра через 0,1 сек. после включения поля. При измерении на начальной кривой намагничённости в момент  $t_0 = 0$  включалось поле  $+H$ , а при измерении на нисходящей ветви петли гистерезиса в момент  $t_0 = 0$  поле переключалось со значения  $+H_{\max}$  на значение  $-H$ . График приведен для

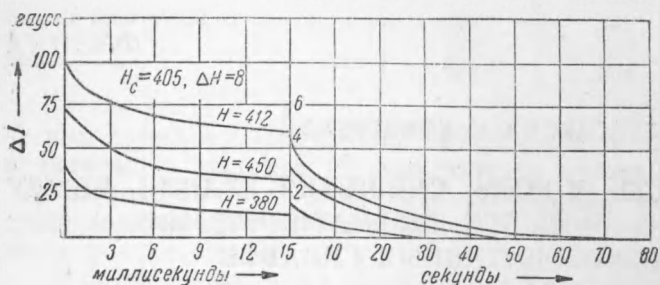


Рис. 1

образца с наибольшей по сравнению с другими величиной коэрцитивной силы.

Измерения других образцов этого сплава, прошедших другую обработку, показали, что величина  $\Delta I$  убывает по мере увеличе-

ния времени отпуска при  $+600^\circ$  первоначально воздушно-закаленных образцов, т. е. по мере усиления распада твердого раствора. Указанные измерения производились при температурах  $-83$ ,  $+20$  и  $+160^\circ$ .

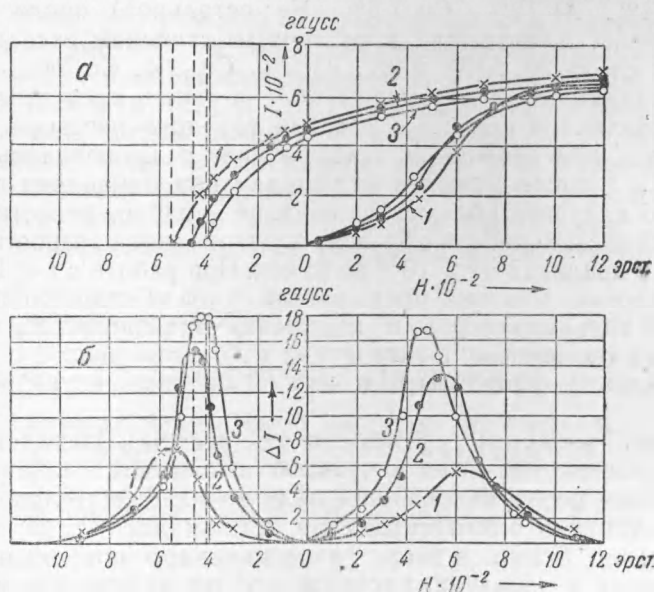


Рис. 2. 1 —  $-183^\circ$ , 2 —  $+20^\circ$ , 3 —  $+160^\circ$

ния времени отпуска при  $+600^\circ$  первоначально воздушно-закаленных образцов, т. е. по мере усиления распада твердого раствора. Указанные измерения производились при температурах  $-83$ ,  $+20$  и  $+160^\circ$ .

Рис. 3, а и б дает прирост величины намагничённости образцов из сплава № 2. Пологая кривая на рис. 2 относится к образцу, охлажденному в магнитном поле, направленном перпендикулярно к направлению измерения.

Соответствующая кривая вязкости на рис. 3, б, ввиду очень малой величины вязкости в этом случае, не представлена. Как и для сплава № 1, величина  $\Delta I$  уменьшается по мере усиления отпуска закаленного сплава.

Рассмотрение полученных результатов приводит к заключению, что явление повышенной вязкости (порядка 1 мин.), наблюдавшееся до сих пор для сравнительно мягких магнитных материалов (<sup>1,3</sup>), имеет место и в высококоэрцитивных сплавах. Наблюденные явления вязкости свидетельствуют о том, что смещение границ доменов играет в процессе перемагничивания этих сплавов существенную роль, так как время релаксации процессов вращения, повидимому, не может быть значительным. Это предположение подтверждается еще и тем, что, как было сказано, вязкость образцов, охлажденных в поперечном магнитном поле, т. е. образцов, имеющих магнитную текстуру в направлении, перпендикулярном намагничению, значительно меньше вязкости, наблюдаемой в образцах, охлажденных в продольном магнитном поле (рис. 3).

В последнее время высказывались предположения, что в высококоэрцитивных сплавах имеет место один процесс вращения и смещение границ отсутствует. Однако легко показать, что в случае, когда энергетически выгоднее разделение участков ферромагнитной фазы на домены, перемагничивание осуществляется через смещение границ, как бы малы ни были исходные размеры зародышей новых доменов. Действительно, зародыши растут, если поле достигает значения (<sup>3,4</sup>)

$$H_k \approx \frac{\gamma}{I_s d_s} + \frac{1}{2I_s} \left( \frac{\partial \gamma}{\partial n} \right)_{\max}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  — поверхностная энергия границы зародыша;  $d_s$  — его исходные размеры, определяемые величиной включений;  $dn$  — перемещение границы в направлении нормали. При малых значениях полей  $\gamma$  в основном зависит от параметров, характеризующих вещество, но когда поле приближается к значению  $H_s \approx K/I_s$ , где  $K$  — константа анизотропии (магнито-упругой и кристаллографической),  $\gamma$  зависит от величины поля (<sup>5,1</sup>) и при  $H \rightarrow H_s$  стремится к нулю. Это значит, что если процесс смещения границ зародышей по той или иной причине задержался при  $H < H_s$ , при  $H \approx H_s$  зародыш любой величины и, в частности, возникший вследствие тепловых флуктуаций, растет беспрепятственно.

Таким образом, вращение не может закончиться, и последней фазой перемагничивания всегда является смещение границ, о чем и свидетельствуют результаты измерений вязкости. Чтобы процесс смещения границ был исключен, необходимо, чтобы участки ферромагнитной фазы были изолированы и чтобы их поперечные размеры  $d$  были меньше некоторой критической величины  $d_k$ , которая по Неелю (<sup>6</sup>)

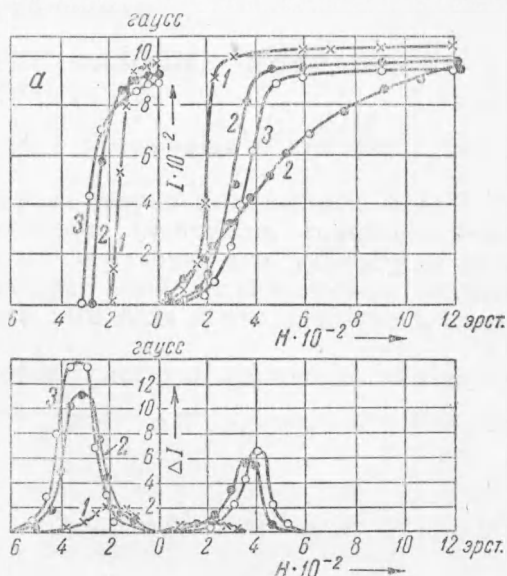


Рис. 3. Обозначения те же, что на рис. 2

для участков сферической формы составляет 300 Å. Возможно, что подобного рода участки ферромагнитной фазы получаются в очень мелких магнитных порошках.

Научно-исследовательский институт физики  
Московского государственного университета  
им. М. В. Ломоносова

Поступило  
15 VII 1949

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> С. В. Вонсовский и Я. С. Шур, Ферромагнетизм, М., 1948. <sup>2</sup> Р. В. Телеснин, ЖЭТФ, 7, 117 (1937); 18, 970 (1948). <sup>3</sup> R. Becker u. W. Döring, Ferromagnetismus, Berlin, 1939. <sup>4</sup> Е. Кондорский, ЖЭТФ, 10, 420 (1940). <sup>5</sup> М. Я. Широбоков, ДАН, 24, 426 (1939). <sup>6</sup> L. Néel, C. R., 224, 1488, 1550 (1947).