

Ф. ГАЛЬПЕРИН, С. ЛАРИН и А. ШИШКОВ

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ НА НАМАГНИЧЕНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ЖИДКОГО АЗОТА

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 22 I 1953)

Влияние высоких давлений на магнитные свойства ферромагнетиков еще мало изучено: например, действию всестороннего сжатия на намагничение насыщения чистых металлов посвящены всего лишь две экспериментальные работы <sup>(1,2)</sup>. В последних непосредственно определяется эффект (изменение магнитного потока  $\frac{1}{\psi_0} \frac{d\psi}{dp}$  через ферромагнетик, см. формулу (2)), вызванный всесторонним сжатием. Изменение же намагничения насыщения вычисляется по формуле

$$\frac{1}{\sigma_0} \frac{d\sigma}{dp} = \frac{1}{\psi_0} \frac{d\psi}{dp} - \frac{1}{3} \chi, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  и  $\psi_0$  — соответственно, намагничение насыщения единицы массы и магнитный поток при давлении  $p_0$ , а  $\sigma$  и  $\psi$  — то же самое под давлением  $p$ ;  $\chi$  — коэффициент сжимаемости.

Из табл. 1 видно, что численные значения эффекта в обеих цитированных работах расходятся как по абсолютной величине, так и по знаку: последний согласно <sup>(1)</sup> отрицателен, а по <sup>(2)</sup> может быть отрицательным или положительным. В настоящей работе, таким образом, предстояло прежде всего уточнить вопрос о знаке эффекта.

Таблица 1

| $\frac{1}{\psi_0} \frac{d\psi}{dp} \cdot 10^7 \text{ атм.}^{-1} *$                       | $\frac{1}{\sigma_0} \frac{d\sigma}{dp} \cdot 10^7 \text{ атм.}^{-1} **$            | Условия опыта                                                                                          | Источник                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $-4 \pm 1 < 0$<br>$0 \pm 0,5 < 0$ или $> 0$<br>$0,24 \pm 0,1 > 0$<br>$0,55 \pm 0,25 > 0$ | $-5,94 \pm 1$<br>$-1,95 \pm 0,5$<br>$-1,70 \pm 0,1$<br>$-1,39 \pm 0,25$<br>$-1,49$ | 20 °C, 1500—1900 эрст.<br>20 °C, 1300—4000 эрст.<br>20 °C, 1800—2000 эрст.<br>—196 °C, 1800—2000 эрст. | <sup>(1)</sup><br><sup>(2)</sup><br>Данная работа<br>Данная работа<br>По формуле <sup>(4)</sup> |

\* Вычислено по формуле (2).

\*\* Вычислено по формуле (1);  $\chi = 5,82 \cdot 10^{-7} \text{ атм.}^{-1}$

Далее, в <sup>(1,2)</sup> исследования велись при комнатной температуре, тогда как для исключения влияния пара-процесса и др. на искомый эффект желательно иметь низкие температуры. В данной работе эксперимент проведен как при температуре жидкого азота (—196°С),

так и при комнатной температуре (20°C). Магнитное поле  $H = 1800 - 2000$  эрст. Оно достаточно для насыщения образца из армко-железа. Сжимающей средой является газ, не затвердевающий при 77°K и 2000 атм. В <sup>(1,2)</sup> для этой цели употребляли масло.

Схема установки дана на рис. 1. Испытуемый образец 1 — точеный стержень из армко-железа длиной 570 мм, диаметром 5,75 мм\*, лежит в камере 3 свободно (зазор между ним и внутренними стенками камеры составляет около 0,2 мм), что позволяет сжимать образец все-

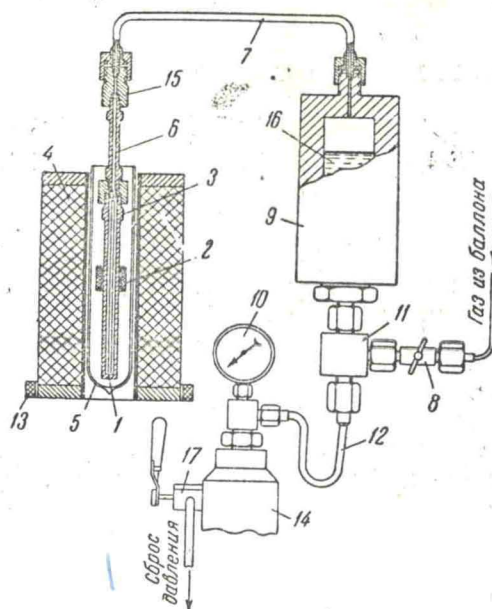


Рис. 1. Схема установки для исследования влияния всестороннего сжатия на намагничивание насыщения при низких температурах. 1 — образец, 2 — измерительная катушка, 3 — камера сжатия из неферромагнитной бронзы БрАЖМ, 4 — намагничивающая катушка, 5 — сосуд Дьюара, 6 — переходная трубка, 7 — трубка верхняя, 8 — вентиль газопуска, 9 — цилиндр поджимки, 10 — манометр, 11 — тройник, 12 — трубка нижняя, 13 — компенсирующая катушка, 14 — гидрокompректор, 15 — переходник, 16 — трансформаторное масло, 17 — вентиль

сторонне. Высокое давление в камере достигается уменьшением первоначального объема газа в полости установки при нагнетании гидрокompктором 14 трансформаторного масла 16 в цилиндр поджимки 9 по трубке 12. Камера с образцом и измерительной катушкой  $K_n$  2, надетой на камеру\*\*, погружена в дьюаров сосуд 5 с жидким азотом.

Принципиальная схема электроизмерительной части установки дана на рис. 2. Намагничивающее поле  $H$  внутри намагничивающего соленоида  $K_n$  создается постоянным током до  $i_{\max} = 20$  амп;  $H_{\max} = Ki_{\max} = 2440$  эрст.

Измерительная цепь состоит из  $K_n$ ,  $K_k$ ,  $R_{ш}$  и  $\Phi_l$  (рис. 2).  $K_n$  и  $K_k$  включены навстречу друг другу для устранения помех, связанных с

\* Образец отожжен в водороде при 1340°C в течение 15 мин., затем нагрет в вакууме до 900°C, после чего охлажден вместе с печью.

\*\* В (2) измерительная катушка помещена внутри камеры.

изменением поля при настройке компенсации. Ввиду светового зайчика (рядом с изменением магнитного поля) наблюдается также изменение главным образом моментом нити под «сползания» зайчика по обычной градуировкой флюксметра. При этом поток меняется не с определенной скоростью, а — 196°C используют измерительные катушки соответственно,  $n_1 = 3960$  и  $n_2 = 1000$  (витков) ввиду того, что сопротивление флюксметра должно быть малым (< 30 ом) при большом количестве витков.

Величина исследуемого магнитного потока вычисляется по формуле:

$$\frac{1}{\psi_0} \frac{d\psi}{dp} \approx \frac{1}{\psi_0} \frac{\Delta\psi}{\Delta p} = \frac{c_\psi}{4\pi I_s S_{\text{обр}} n}$$

где  $\psi_0 = 4\pi I_s S_{\text{обр}}$  максвелл, витков в  $K_n$ ,  $\alpha$  — отклонение флюксметра в делениях,  $\Delta p = \Delta p_{\text{осн}} - p_{\text{атм}}$  (атмосфер).

Для исследуемого армко-железа  $I_s = 1690$  гаусс,  $S = 0,25$  см<sup>2</sup>. Из проведенных 22 измерений получено  $\left(\frac{\alpha}{\Delta p}\right)$ ; по нему, согласно (1),

$$\left(\frac{1}{\psi_0} \frac{\Delta\psi}{\Delta p}\right)$$

и, наконец, согласно (1):

Сравним значение, полученное по формуле для атомного магнетизма металлов (3):

$$m = 2m_0$$

где  $m_0 = n_d - 2$ ;  $n_d$  — число атомов. Для железа  $n_d = 26$  — атомный номер,  $n_a$  — расстояние между атомами.

\* Измерения проводятся в дьюаровом сосуде. Вводится газ из баллона до давления 2000 атм. Цилиндр поджимки 9 нагнетается маслом. После выдержки для установления равновесия соленоида в сеть подается ток для создания магнитного поля.  $R_{ш}$  компенсируется изменением тока в на рукоятки вентилей 17 плавно. При этом давление падает, скорости можно пренебречь и магнитного потока через образ

ле  $H = 1800$  —  
армко-железа.  
й при  $77^\circ\text{K}$  и  
ц  $I$  — точный  
75 мм\*, лежит  
стенками ка-  
образец все-

изменением поля при колебаниях тока в  $K_n$ . Реостат  $R_{ш}$  служит для  
изстройки компенсации. Исследуемый эффект измеряется по отклоне-  
нию светового зайчика флюксметра. При медленном снятии давления,  
наряду с изменением магнитного потока, вызванного падением давле-  
ния, наблюдается также «сползание» зайчика флюксметра, обуслов-  
ленное главным образом крутиль-  
ным моментом нити подвеса. Учет  
«сползания» зайчика производится  
обычной градуировкой флюксметра,  
но при этом поток меняется плав-  
но, с определенной скоростью. При  
 $20$  и  $-196^\circ\text{C}$  используются разные  
измерительные катушки (соответ-  
ственно,  $n_1 = 3960$  и  $n_2 = 6240$  вит-  
ков) ввиду того, что сопротивление  
в цепи флюксметра должно быть  
малым ( $< 30$  ом) при достаточно  
большом количестве витков в  $K_n$ .\*  
Величина исследуемого эффекта  
вычисляется по формуле:

$$\frac{1}{\psi_0} \frac{d\psi}{dp} \approx \frac{1}{\psi_0} \frac{\Delta\psi}{\Delta p} = \frac{c_\psi}{4\pi I_s S_{\text{обр}} n} \frac{\alpha}{\Delta p}, \quad (2)$$

где  $\psi_0 = 4\pi I_s S_{\text{обр}}$  максвелл,  $n$  — число  
витков в  $K_n$ ,  $\alpha$  — отклонение флюкс-  
метра в делениях,  $\Delta p = p_0 - p$  (ат-  
мосфер).

Для исследуемого образца из  
железа  $I_s = 1690$  гаусс,  $S = 0,26$  см<sup>2</sup>.  
Из проведенных 22 измерений най-  
дено  $\left(\frac{\alpha}{\Delta p}\right)$ ; по нему, согласно (2):

$$\left(\frac{1}{\psi_0} \frac{\Delta\psi}{\Delta p}\right) = (0,55 \pm 0,25) 10^{-7} \text{ атм}^{-1} > 0,$$

и, наконец, согласно (1):  $\frac{1}{\sigma_0} \frac{d\sigma}{dp} = (-1,39 \pm 0,25) 10^{-7} \text{ атм}^{-1}$ .

Сравним значение, полученное по (1), со значением, вычисленным  
по формуле для атомного магнитного момента чистых ферромагнитных  
металлов (3):

$$m = 2m_0 + K_1(d_1 - D) \pm K_2(d_2 - D)^*, \quad (3)$$

где  $m_0 = n_d - 2$ ;  $n_d$  — число непарных  $d$ -электронов изолированного  
атома. Для железа  $n_d = 4$ ,  $K_1 = 5,13$  и  $K_2 = 3,85$  магнетон / кХ;  $d_1$  и  $d_2$  —  
расстояния между атомом и, соответственно, ближайшими и следую-

\* Измерения проводятся в следующем порядке: 1) Через вентиль 8 в установку  
вводится газ из баллона до давления  $p_0 = 150$  атм.; вентиль 17 закрыт. 2) В цилиндр  
поджимки 9 нагнетается масло 16 до давления около 2000 атм. 3) Дается 10-минут-  
ная выдержка для установления температуры. 4) При включенном флюксметре вклю-  
чается соленоид в сеть постоянного тока. При помощи реостатов  $R$  (рис. 2) установ-  
ливается ток для создания поля около 2000 эрст. 5) Включается  $\Phi_L$ ; при помощи  
 $R_{ш}$  компенсируется изменение внешнего магнитного поля, обусловленное искусствен-  
ным изменением тока в намагничивающем соленоиде. 6) Медленным поворотом  
рукоятки вентили 17 плавно выпускается масло из цилиндра поджимки до давления  
 $p_0$ . При этом давление падает равномерно со скоростью 1000 атм/мин. При данной  
скорости можно пренебречь изменением температуры массивного образца. Изменение  
магнитного потока через образец измеряется по отклонению зайчика флюксметра.

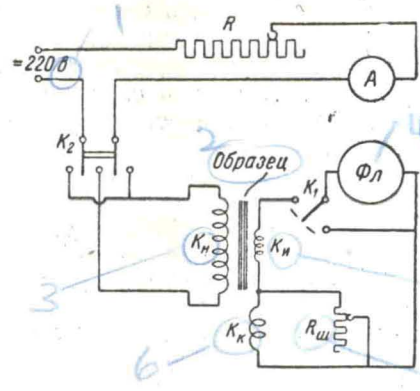


Рис. 2. Принципиальная схема электро-  
измерительной части установки.  $K_n$  —  
намагничивающая катушка (открытый  
соленоид с естественным воздушным  
охлаждением); постоянная  $K$  соленои-  
да = 122 эрст./амп.; внутренний диаметр,  
длина и область однородности поля со-  
леноида равны, соответственно, 60, 670  
и 200 мм.  $K_k$  — измерительная катушка  
(длина обмотки 160 мм);  $K_k$  — компенси-  
рующая катушка;  $R_{ш}$  — реостат, шун-  
тирующий  $K_k$ ;  $\Phi_L$  — флюксметр типа  
Грассо с постоянной по потоку  $c_\psi = 380 \pm 5$   
максвелл/деление и допустимым внеш-  
ним сопротивлением  $R_{\text{внешн.}} \leq 30$  ом.  
Расстояние до шкалы около 3 м

*K has been used  
for key, constant,  
compensation,  
and coil; have  
changed coils  
to C*

*I think this  
astroph  
should not  
be included*

*This is odd!  
According to 4 it  
was already on  
I have a feeling  
this should  
be Выход —  
(circled off)*

лением перво-  
етании гидро-  
др поджимки  
тушкой  $K_n$  2,  
идким азотом.  
становки дана  
зающего соле-  
макс =  $K_i$  макс =  
2).  $K_n$  и  $K_k$   
связанных с  
затем нагрет в

щими ближайшими соседями; для железа  $d_1 = 2,478$  кХ,  $d_2 = 2,86$  кХ.  $D$  — характерная для каждого переходного металла эмпирическая постоянная; для железа она равна  $2,73$  кХ. Отрицательный знак перед третьим членом (3) берется, если  $d_2 > D$  (как для железа). Подставив в (3) численные значения для железа, найдем, что  $m = 2,23$  магнетона (опыт дает  $2,22$ ). Из формулы (3) вытекает следствие: при всестороннем сжатии (уменьшаются  $d_1$  и  $d_2$ )  $m$  должен уменьшаться, а при всестороннем растяжении — увеличиваться.

Известно, что это следствие качественно подтверждается опытами<sup>(1,2,4)</sup>. Для количественной оценки эффекта продифференцируем (3). Находим:

$$\frac{1}{\sigma_0} \frac{d\sigma}{dp} = \frac{1}{m} \frac{dm}{dp} = -\frac{1}{3} \chi \frac{1}{m} (K_1 d_1 - K_2 d_2). \quad (4)$$

В (4) принято, что  $\frac{1}{a_0} \frac{\partial d}{\partial p} = -\frac{1}{3} \chi$ . Подставив в (4) численные значения (см. выше) для железа, найдем  $\frac{1}{\sigma_0} \frac{d\sigma}{dp} = -1,49 \cdot 10^{-7}$  атм<sup>-1</sup>, что удовлетворительно согласуется с данными настоящей работы при температуре жидкого азота (ср. 4-ю и 5-ю строки табл. 1), а с<sup>(1)</sup> сильно расходится (ср. 1-ю и 5-ю строки табл. 1).

Поступило  
21 I 1953

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Н. Ebert, A. Kussman, Phys. Z., 38, 437 (1937). <sup>2</sup> Ф. Гальперин, ДАН, 78, 451 (1951); П. Орешкин, Диссертация, МГУ, 1951. <sup>3</sup> Ф. Гальперин, Изв. АН СССР, сер. физ., 13, 574 (1949); ДАН, 88, № 4 (1953). <sup>4</sup> К. Белов, ЖЭТФ, 19, 346 (1949); ДАН, 61, 807 (1948).

ИСКЛЮЧЕНИ

(Пр

При расче  
молекул част  
зависимые ко  
вать симметр  
решение зад  
соотношения,  
степени веко  
или использу  
порядка матр  
перемножают  
ния между к  
образом матр

Правила у  
вариантах по  
ния механики  
речь идет о  
показано ниж  
более просто

Пусть меж  
в расчете кол

где  $a_i$  — неко  
Исключени  
ход от коорд

согласно соот

или, в вектор

\* Следует за  
ляется вырожден  
в этом случае н