

Б. И. ВЕРКИН

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ ЦИНКА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 3 X 1951)

Явление периодической зависимости магнитной восприимчивости от напряженности магнитного поля, более 17 лет считавшееся аномальным свойством монокристаллов висмута, открыто в настоящее время у большого числа металлов, а именно: у монокристаллов цинка<sup>(1)</sup>, кадмия, бериллия, магния, олова, индия<sup>(2)</sup>, сурьмы, галлия и графита<sup>(3)</sup>. Однако исследования этого явления, представляющего собой следствие диамагнетизма электронов проводимости в металлах, проявляющегося при низких температурах, проведены пока в весьма малой области полей.

Целью данной работы явилось исследование разности главных удельных восприимчивостей монокристаллов Zn

в области температур от 1,8 до 20,4° К и в интервале полей от 1500 до 15 000 эрст.

Метод исследования сводился попрежнему к измерению пары сил, действующей на кристалл, подвешенный в однородном магнитном поле на тонкой упругой нити<sup>(2)</sup>. Монокристалл цинка располагался в поле так, что его ось шестого порядка была перпендикулярна оси подвеса, а одна из бинарных осей кристалла была ориентирована вдоль оси подвеса.

При  $T = 4,2^\circ\text{К}$  и в поле  $H = 4000$  эрст. измерена угловая зависимость пары сил, действующей на монокристалл цинка в постоянном внешнем поле. Она изображена на рис. 1, где по оси ординат отложена величина пары сил в произвольных единицах, а по оси абсцисс — угол  $\varphi$  между вектором поля  $\mathbf{H}$  и кристаллографической осью шестого порядка цинкового монокристалла. Далее при  $T = 4,2^\circ\text{К}$  для углов  $\varphi = 10, 20$  и  $30^\circ$  на одном и том же приборе была измерена зависимость разности главных удельных восприимчивостей ( $\chi_{\parallel} - \chi_{\perp}$ ) от напряженности внешнего магнитного поля.

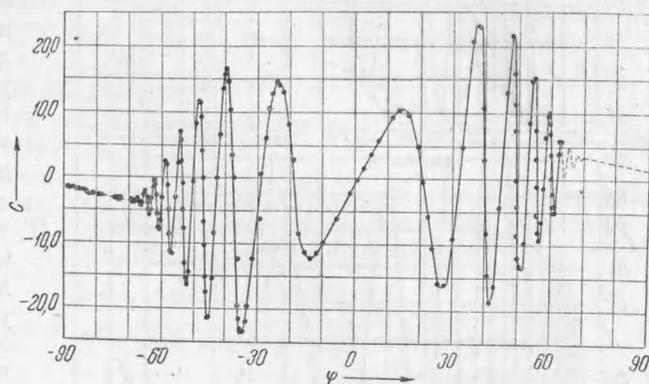


Рис. 1. Угловая зависимость пары сил, действующей на кристалл цинка в однородном магнитном поле  $H = 4000$  эрст. при  $T = 4,2^\circ\text{К}$

Результаты этих измерений представлены на рис. 2, где по оси ординат отложена величина  $(\Delta\alpha/H^2)$ , пропорциональная  $(\chi_{\parallel} - \chi_{\perp})$  ( $\Delta\alpha$  — угол закручивания тонкой проволоочки в поле  $H$  для заданного значения  $\varphi$ , выраженный в миллиметрах отклонения на шкале), а по оси абсцисс — напряженность внешнего поля  $H$  в эрстедах. Приведенные на рис. 2 данные показывают, что у монокристалла Zn огибающая кривой  $\Delta\chi = \Delta\chi(H)$  имеет максимум. Амплитуда осцилляций разности главных восприимчивостей в малых полях растет по мере увеличения напряженности поля; при некотором поле  $H_{\max}$  она достигает максимальной величины, после чего уменьшается. Из рисунка видно также, что поле  $H_{\max}$ , соответствующее максимуму огибающей кривой  $\Delta\chi = \Delta\chi(H)$ , увеличивается по мере увеличения угла  $\varphi$ .

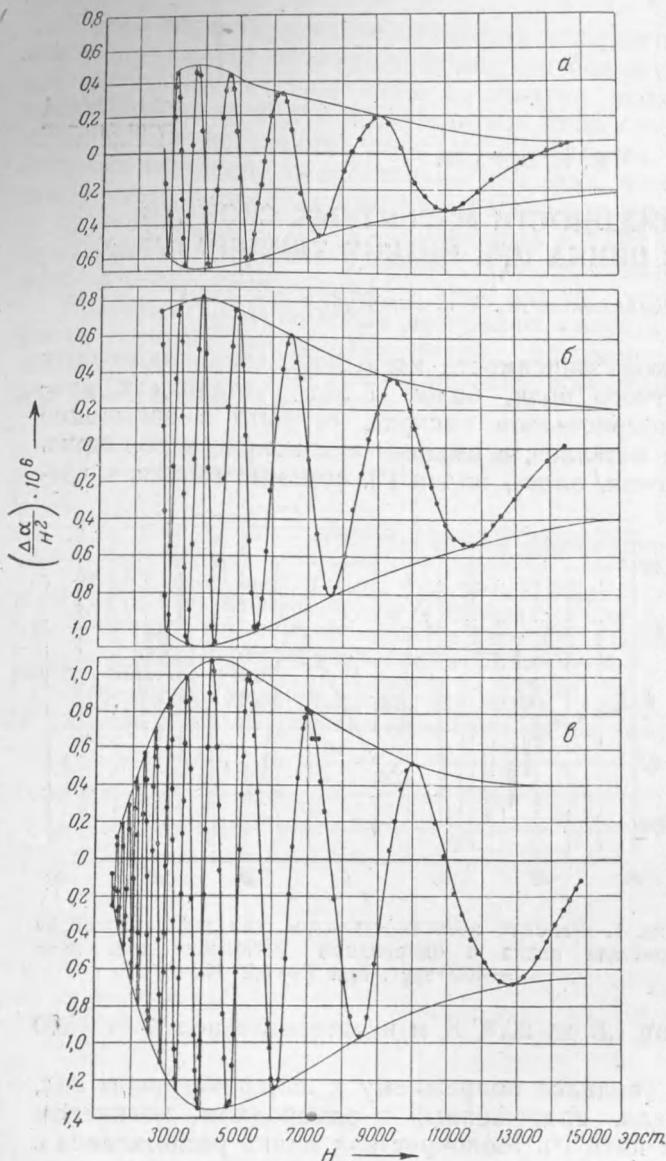


Рис. 2. Зависимость разности главных восприимчивостей кристалла цинка от напряженности магнитного поля  $T = 4,2^\circ \text{K}$ . а —  $\varphi = 10^\circ$ , б —  $\varphi = 20^\circ$ , в —  $\varphi = 30^\circ$

меньших полей. В самом деле, при  $T = 20,4^\circ \text{K}$  вплоть до 15000 эрст. не проявляется максимум огибающей кривой  $\Delta\chi(H)$ ; при  $T = 4,2^\circ \text{K}$   $H_{\max} = 3800$  эрст., а при  $T = 1,88^\circ \text{K}$   $H_{\max} = 2950$  эрст., т. е. еще меньше.

Существующая теория явления периодической зависимости разности восприимчивостей металлов от напряженности магнитного поля при низких температурах <sup>(4,5)</sup> базируется на модели свободных электронов в металле. Тем не менее она качественно описывает все особенности этого явления, в том числе и открытый в данной работе

на рис. 2 данные показывают, что у монокристалла Zn огибающая кривой  $\Delta\chi = \Delta\chi(H)$  имеет максимум. Амплитуда осцилляций разности главных восприимчивостей в малых полях растет по мере увеличения напряженности поля; при некотором поле  $H_{\max}$  она достигает максимальной величины, после чего уменьшается. Из рисунка видно также, что поле  $H_{\max}$ , соответствующее максимуму огибающей кривой  $\Delta\chi = \Delta\chi(H)$ , увеличивается по мере увеличения угла  $\varphi$ . В самом деле, для  $\varphi = 10^\circ$   $H_{\max} = 3800$  эрст., для  $\varphi = 20^\circ$   $H_{\max} = 4000$  эрст. и для  $\varphi = 30^\circ$   $H_{\max} = 4430$  эрст. Следует заметить, что до настоящего времени указанный максимум и его угловая зависимость не были обнаружены ни у одного из исследованных металлов.

На рис. 3 изображены результаты исследования температурной зависимости  $H_{\max}$  для  $\varphi = 10^\circ$ . Из рис. 3 видно, что при понижении температуры поле  $H_{\max}$ , соответствующее максимуму огибающей кривой  $\Delta\chi = \Delta\chi(H)$ , сдвигается в область

максимум огибающей кривой  $\Delta\chi(H)$ . В самом деле, существующая теория дает для восприимчивости металлического кристалла при низких температурах следующее выражение (4):

$$\frac{I}{H} = -A' \left[ \frac{\pi^2}{6} \left( \frac{k}{E_0} \right)^{1/2} - \frac{1}{VT} \left( \frac{\beta H}{2\pi^2 kT} \right)^{-3/2} e^{-\frac{2\pi^2 kT}{\beta H}} \times \sin \left( \frac{2\pi E_0}{\beta H} - \frac{\pi}{4} \right) \right],$$

если  $E_0 \gg kT \gg \beta H / 2\pi^2$ . Величины  $A'$  и  $\beta$ , входящие в это выражение, зависят от параметров  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$ , представляющих собой компоненты тензора эффективных электронных масс по трем взаимноперпендикулярным направлениям в кристалле, и от величины  $E_0$  — граничной энергии электронов, обуславливающих в металле явление периодической зависимости разности главных восприимчивостей. В общем случае

$$\beta = \frac{e\hbar}{cm_{эфф}}, \quad m_{эфф} = \frac{V m_1 m_2 m_3}{V m_1 \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi' + m_2 \sin^2 \varphi \sin^2 \varphi' + m_3 \cos^2 \varphi},$$

где  $\varphi$  — угол, образованный вектором поля  $H$  с главной кристаллографической осью кристалла, а  $\varphi'$  — угол, образованный вектором поля с одной из бинарных осей. В нашем случае  $\varphi' = \pi/2$  и

$$m_{эфф} = \frac{V m_1 m_2 m_3}{V m_2 \sin^2 \varphi + m_3 \cos^2 \varphi}.$$

Амплитуда осцилляций разности восприимчивостей определяется в теории выражением вида:

$$F = B_1 H^{-3/2} e^{-B_2 H},$$

где  $B_1 = A' \frac{1}{VT} \left( \frac{\beta}{2\pi^2 kT} \right)^{-3/2}$  и  $B_2 = \frac{2\pi^2 kT}{\beta}$ . Легко видеть, что это выражение имеет максимум при значении внешнего поля, равном

$$H_{\max} = \frac{4}{3} \pi^2 kT \frac{1}{\beta} = \frac{4}{3} \pi^2 kT \frac{c}{e\hbar} \frac{V m_1 m_2 m_3}{V m_2 \sin^2 \varphi + m_3 \cos^2 \varphi}.$$

Предположим, что для цинка  $m_3 \gg m_2$ , тогда

$$H_{\max} = \frac{4}{3} \frac{\pi^2 c k}{e\hbar} \sqrt{m_1 m_2} \frac{T}{\cos \varphi}.$$

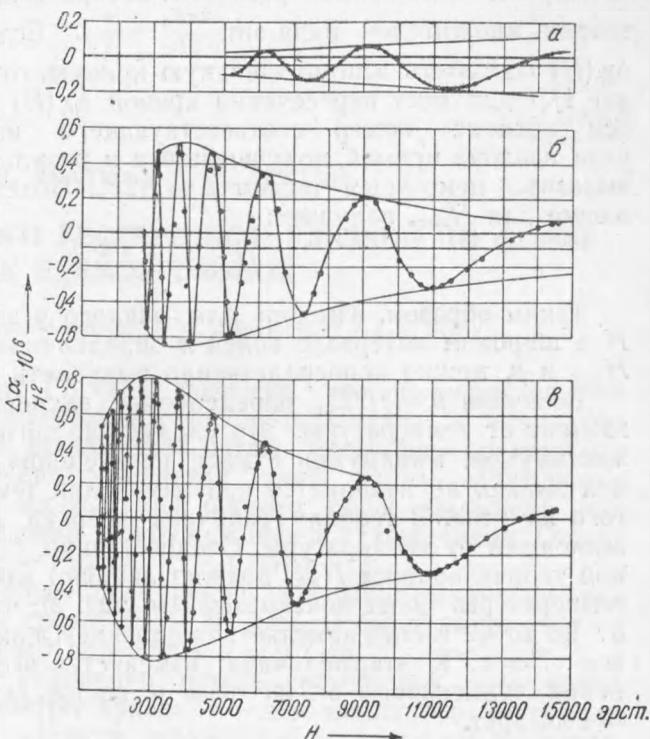


Рис. 3. Зависимость разности главных восприимчивостей кристалла цинка от напряженности магнитного поля.  $\varphi = 10^\circ$ . а —  $T = 20,4^\circ\text{K}$ , б —  $T = 4,2^\circ\text{K}$ , в —  $T = 1,88^\circ\text{K}$

Таким образом, существующая теория явления описывает экспериментально наблюдаемый максимум огибающей кривой  $\Delta\chi(H)$ ; она дает правильную угловую зависимость  $H_{\max}$  в предположении, что для  $Zn$   $m_3 \gg m_2$ .

Период осцилляций разности восприимчивостей определяется в теории множителем вида  $\sin\left(\frac{2\pi E_0}{\beta H} - \frac{\pi}{4}\right)$ . Если для данной кривой  $\Delta\chi(H)$  построить вспомогательную кривую, откладывая по оси ординат  $1/H$  для мест пересечения кривой  $\Delta\chi(H)$  со средней линией, а по оси абсцисс — номер соответствующего пересечения, то тангенс угла наклона прямой, получающейся в результате такого построения, выразится некоторым числом  $p = \beta/2E_0$ . Подставляя  $\beta = p2E_0$  в выражение для  $H_{\max}$ , получаем:

$$H_{\max} = \frac{2}{3} \frac{\pi^2 k T}{p E_0}.$$

Таким образом, измерив для данного  $\varphi$  зависимость  $(\chi_{\parallel} - \chi_{\perp})$  от  $H$  в широком интервале полей и определив экспериментальным путем  $H_{\max}$  и  $p$ , можно непосредственно вычислить величину  $E_0$ .

Величина  $p = \beta/2E_0$ , определяемая экспериментальным путем, не зависит от температуры. Это следует из того факта, что положение максимумов, минимумов и мест пересечения кривой  $\Delta\chi(H)$  со средней линией не изменяется при изменении температуры для одного и того же угла. В теории граничная энергия  $E_0$  полагается также не зависящей от температуры. Следовательно, с точки зрения современной теории вопроса  $H_{\max}$  должно линейно изменяться при изменении температуры. Опыт показывает (см. рис. 3), что в области температур от 1,8 до 4,2°К  $H_{\max}$  изменяется медленнее, а именно, от  $H_{\max} = 3800$  эрст. при  $T = 4,2^\circ\text{К}$  эта величина изменяется всего в 1,28 раза при изменении температуры в 2,23 раза и составляет при  $T = 1,88^\circ\text{К}$   $H_{\max} = 2950$  эрст.

В соответствии с этим вычисление граничной энергии на основании данных опытов, проведенных при различных температурах, приводит к сильно отличающимся результатам. В самом деле, при  $T = 4,2^\circ\text{К}$ ,  $\varphi = 10^\circ$   $H_{\max} = 3800$  эрст., и вычисление дает для этой величины значение  $E_0 = 0,025$  эв, в то время как при  $T = 1,878^\circ\text{К}$ ,  $\varphi = 10^\circ$  и  $H_{\max} = 2950$  эрст.,  $E_0 = 0,014$  эв, т. е. почти в два раза меньше.

Это обстоятельство означает, что величины  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ , а также и число электронов, обуславливающих периодическое изменение восприимчивости металла, вычисленное на основании сравнения теории с данными нескольких опытов, проведенных при различных температурах, имеют различные, взаимно не согласующиеся значения. При этом следует указать, что число электронов, обуславливающее периодическое изменение восприимчивости цинка, полученное на основании сравнения теории с опытом<sup>(6)</sup>, в  $10^6$  раз меньше того числа электронов проводимости, которое известно для этого металла из данных об электропроводности. Все это свидетельствует о несовершенстве современной теории явления, несмотря на то, что она качественно и описывает основные опытные факты.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность Б. Г. Лазареву за ценные дискуссии, а также Н. С. Руденко за помощь в измерениях.

Физико-технический институт  
Академии наук УССР

Поступило  
23 I 1951

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> J. Markus, Phys. Rev., **71**, 559 (1947). <sup>2</sup> Б. И. Веркин, В. Г. Лазарев и Н. С. Руденко, ЖЭТФ, **20**, 995 (1950). <sup>3</sup> D. Shoenberg, Nature, **164**, 225 (1949). <sup>4</sup> Л. Д. Ландау, Proc. Roy. Soc., A, **170**, 341 (1939) (теоретич. часть работы Шенберга). <sup>5</sup> А. И. Ахизер, ДАН, **23**, 872 (1939); Ю. Б. Румер, ЖЭТФ, **18**, 1081 (1948). <sup>6</sup> S. Sydorjak and J. Robinson, Phys. Rev., **75**, 118 (1949).