

Н. В. ЗАВАРИЦКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК  
ТАЛЛИЯ И ОЛОВА, СКОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРИ НИЗКИХ  
ТЕМПЕРАТУРАХ

(Представлено академиком Л. Д. Ландау 21 VII 1952)

При исследовании пленок олова в ряде работ (1-4) было обнаружено существенное отличие сверхпроводящих свойств образцов, сконденсированных при низкой температуре, от свойств тех же образцов, отогретых до комнатной температуры, однако детального изучения свойств пленок, приготовленных при низкой температуре, не производилось. В настоящей статье приведены результаты исследования образцов пленок из олова и таллия толщиной от нескольких микрон до  $2 \cdot 10^{-6}$  см, сконденсированных при 80 и 2° К.

1. Образцы наносились посредством испарения металла в вакууме на плоскополированную поверхность стекла. Образцы исследовались непосредственно после приготовления, и их отогрев был полностью устранен. Измерялась зависимость сопротивления пленок от температуры и внешнего магнитного поля, которое устанавливалось параллельно плоскости образцов с точностью до нескольких минут.

У исследованных нами образцов интервал температур, в котором происходило падение их сопротивления от величины в нормальном состоянии  $R_n$  до нуля, не превосходил 0,02°. Критическая температура пленок сконденсированных при низких температурах ( $T_K$ ), существенно отличалась от критической температуры, обычно наблюдавшейся у таллия и олова (см. табл. 1). У пленок, сконденсированных при 2° К, в исследованном интервале толщин не наблюдается заметного влияния толщины образца на  $T_K$ . У образцов, приготовленных при 80° К, тоньше чем  $10^{-5}$  см наблюдается систематическое повышение  $T_K$  до 0,2°.

Интервал полей, в котором происходило изменение сопротивления образцов в магнитном поле от нуля до  $R$ , не превосходил 10—20% от величины  $H_K$  (поля, при котором сопротивление равно  $R_n$ ). Переход из сверхпроводящего состояния в нормальное и обратно происходил при одном и том же значении критического магнитного поля. Критическое магнитное поле пленок, сконденсированных при низкой температуре, в несколько раз больше, чем  $H_K$  тех же образцов, но отожженных до комнатной температуры (см. рис. 1). Изменение критического магнитного поля пленок связано с температурой их приготовления. Так, у образцов

Таблица 1

Металл	Критич. тем-ра в °К	Т-ра конденсации пленок		
		Критич. т-ра пленок в °К (средн. знач).		
		300° К (отжиг)	80° К	2° К
Олово	3,72	3,8	4,05	4,6
Таллий	2,40	2,35	2,5	2,9

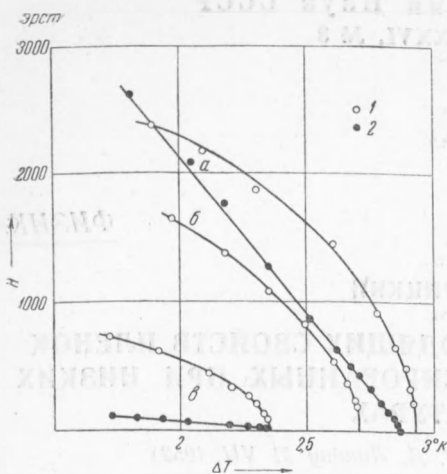


Рис. 1. Критическое магнитное поле пленок из таллия толщиной (1)  $1,3 \cdot 10^{-6}$  см, (2)  $7,65 \cdot 10^{-6}$  см, а — сконденсированных при  $2^\circ \text{K}$ ; б — отогретых до  $80^\circ \text{K}$ , в — отогретых до  $300^\circ \text{K}$

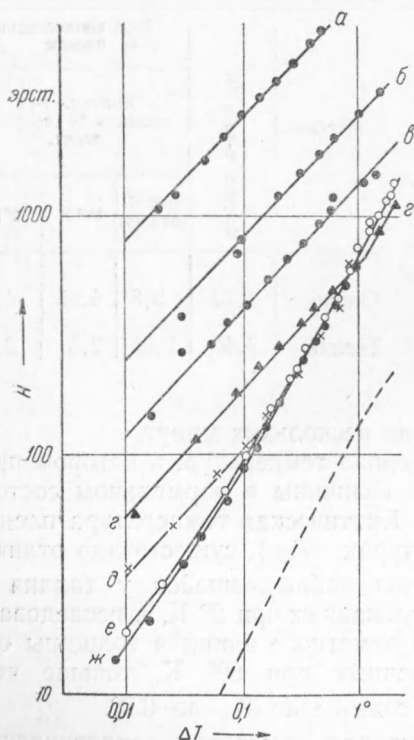


Рис. 2. Зависимость критического магнитного поля от  $\Delta T = T_c - T$  для образцов олова различной толщины, сконденсированных при  $80^\circ \text{K}$ : а —  $2,20 \cdot 10^{-6}$ , б —  $5,70 \cdot 10^{-6}$ , в —  $9,10 \cdot 10^{-6}$ , г —  $2,5 \cdot 10^{-5}$ , д —  $4,00 \cdot 10^{-5}$ , е —  $7,05 \cdot 10^{-5}$ , ж —  $1,20 \cdot 10^{-4}$  см. Пунктир — критическое магнитное поле массивного образца, изготовленного при  $300^\circ \text{K}$

таллия толщиной около  $10^{-4}$  см, приготовленных при  $80$  и  $2^\circ \text{K}$ , наблюдается увеличение  $H_c$  соответственно в 6 и в 20 раз по сравнению с отожженными образцами.

2. Было проведено измерение магнитного момента образцов таллия и олова толщиной около  $10^{-3}$  см. Конденсация образцов производилась на внутреннюю поверхность цилиндрической медной трубки. Возможность возникновения циркуляционных токов по пленке была устранена. Измерялся отброс баллистического гальванометра, соединенного с двумя катушками, направленными навстречу друг другу, при перемещении образца в постоянном магнитном поле из одной катушки в другую. Перед каждым последующим измерением образец отогревался до температуры выше критической.

Результаты измерения магнитного момента образца таллия непосредственно после конденсации и после последующего отжига до  $300^\circ \text{K}$  приведены на рис. 4. (Для образцов олова получены аналогичные результаты). Зависимость магнитного момента от внешнего поля, как видно из рис. 4, совпадает с обычно наблюдаемой у массивных образцов лишь у отожженных пленок. Для неотожженных пленок, помимо резко отличающейся зависимости момента от внешнего поля, характерно существенное изменение критической температуры:  $2,53$  и  $4,05^\circ \text{K}$ , соответственно, для таллия и олова, вместо обычных  $2,40$  и  $3,72^\circ \text{K}$ .

3. Результаты измерения свойств образцов, приведенные выше, показывают, что конденсация металла при низкой температуре приводит к возникновению нового состояния с особыми сверхпроводящими свойствами. При этом интервал температур и относительный интервал полей, в которых происходит переход из нормального в сверхпроводящее состояние, свидетельствует о достаточной чистоте и однородности каждого из исследованных образцов металла в этом новом состоянии.

Изменение свойств металла, по видимому, объясняется тем, что образцы, приготовленные при  $80$  и

2° К, имеют чрезвычайно дисперсную, приближающуюся к аморфной структуру. Искажение решетки приводит к изменению сверхпроводящих свойств металла. Эти искажения сказываются не только на одних сверхпроводящих свойствах. Так, удельное сопротивление при 4,2° К у неотожженных образцов в 10 раз больше, чем сопротивление тех же образцов, отогретых до комнатной температуры. С искажениями решетки, видимо, связаны и возникающие в пленках макроскопические натяжения, приводящие к механическому разрыву и свертыванию в чешуйки образцов толщиной в несколько микрон. Этот разрыв происходит как при конденсации образцов на стеклянную, так и на медную поверхность.

Наибольшее изменение структуры металла происходит во время его конденсации при 2° К. При 80° К роль ползания атомов уже значительна. Об этом свидетельствует как зависимость свойств пленок от температуры их приготовления, так и заметное изменение свойств образцов, сконденсированных при 2° К, в результате их отжига до 80° К (рис. 1).

Повидимому, сходные искажения решетки могут возникнуть при деформации образцов в условиях, затрудняющих подвижность атомов. Это подтверждает исследование свойств так называемых «твердых» сверхпроводников (5), и изучение влияния пластической деформации при низкой температуре на свойства «мягких» сверхпроводников (6).

4. По характеру разрушения сверхпроводимости внешним магнитным полем сверхпроводники могут быть разделены на 2 группы. У сверхпроводников 1-й группы заметное проникновение поля в толщину образца (образец с малым размагничивающим фактором) происходит лишь при критическом магнитном поле; у сверхпроводников 2-й группы проникновение поля начи-

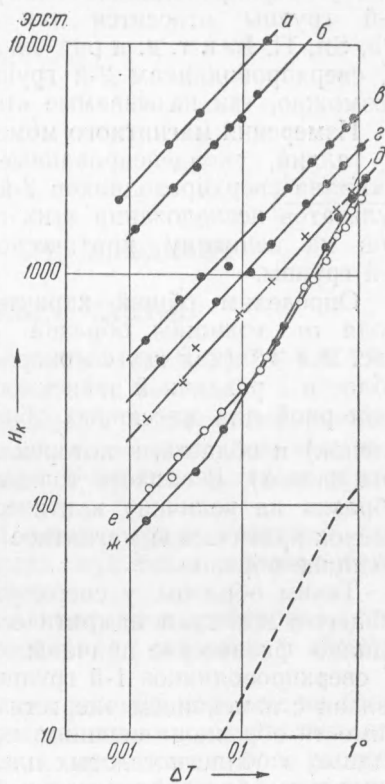


Рис. 3. Зависимость критического магнитного поля от  $\Delta T$  для образцов таллия различной толщины, сконденсированных при 2° К. *a* —  $1,45 \cdot 10^{-6}$  см, *б* —  $2,0 \cdot 10^{-6}$  см, *в* —  $7,3 \cdot 10^{-6}$  см, *г* —  $1,2 \cdot 10^{-5}$  см, *д* —  $1,3 \cdot 10^{-5}$  см, *е* —  $3,55 \cdot 10^{-5}$  см, *жс* —  $7,65 \cdot 10^{-5}$  см. Пунктир — критическое магнитное поле массивного образца, изготовленного при 300°К

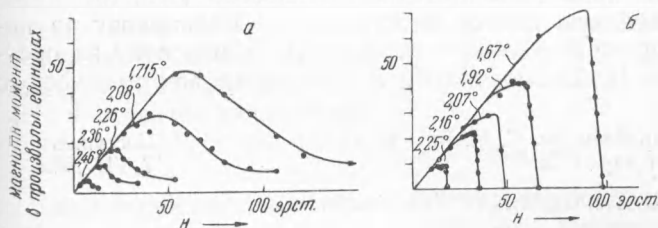


Рис. 4. Зависимость от внешнего магнитного поля момента образца таллия. *a* — сконденсированного при 80° К, *б* — отогретого до 300° К. Над кривыми приведены значения температуры изменения

сверхпроводимости у сверхпроводников 1-й группы происходит путем фазового перехода первого рода, у сверхпроводников 2-й группы — фазового пере-

хода с величины в несколько раз меньшей, чем критическое магнитное поле. Для этих сверхпроводников энергетически выгодно существование в широком интервале полей смешанного состояния нормальной и сверхпроводящей фаз. Разрушение магнитным полем сверхпро-

хода второго рода. С последним, видимо, и связано значительно большее значение критического магнитного поля у сверхпроводников 2-й группы, чем у сверхпроводников 1-й группы. Как известно, к сверхпроводникам 1-й группы относятся так называемые «мягкие» сверхпроводники Pb, Sn, Tl, In и т. д. и ряд бинарных соединений  $\text{Au}_2\text{Bi}$ ,  $\text{CuS}$ ,  $\text{NaBi}$  и т. д. К сверхпроводникам 2-й группы принадлежит большинство сплавов и, возможно, так называемые «твердые» сверхпроводники Nb, Ta.

Измерения магнитного момента пленок (рис. 4) показывают, что олово и таллий, сконденсированные при низкой температуре, приобретают свойства сверхпроводников 2-й группы. Это позволяет на основании результатов исследования этих пленок выяснить влияние размеров образцов на величину критического магнитного поля сверхпроводников 2-й группы.

Определим общий характер зависимости критического магнитного поля от толщины образца. У исследованных пленок, как видно из рис. 2 и 3\* (как и у сверхпроводников 1-й группы (7)), имеют место две области с различной зависимостью  $H_k$  от  $\Delta T$ : область зависимости, характерной для массивных образцов сверхпроводников (область толстых пленок) и область, в которой  $H_k$  пропорционально  $\Delta T^{1/2}$  (область тонких пленок). В области толстых пленок нет заметного влияния толщины образца на величину критического магнитного поля, в области тонких пленок критическое магнитное поле изменяется обратно пропорционально толщине образца.

Таким образом, у сверхпроводников 1-й и 2-й групп имеется много общего в зависимости критического магнитного поля от толщины образца, однако физические причины этой зависимости, повидимому, различны. У сверхпроводников 1-й группы переход от толстых к тонким пленкам связан с изменением энергетического характера разрушения сверхпроводимости образцов внешним полем (7). У сверхпроводников 2-й группы, видимо в области толстых пленок имеет место некоторая периодическая структура областей нормальной и сверхпроводящей фаз, которая исчезает при уменьшении толщины образцов до размеров, сравнимых с ее периодом. С этим обстоятельством и связано изменение характера зависимости  $H_k$  от  $\Delta T$  при переходе от толстых к тонким пленкам.

Для количественного определения влияния размеров на величину критического магнитного поля наиболее правильно сравнивать свойства отдельного образца при различных температурах, используя изменение глубины проникновения с температурой (7). При этом отпадает необходимость сопоставлять свойства различных образцов, которые, вообще говоря, могут несколько отличаться из-за различия структуры. Такому анализу были подвергнуты результаты исследования свойств ряда образцов. Его результаты и их сравнение с макроскопической теорией сверхпроводников 2-й группы приведены в статье Абрикосова (8).

Автор выражает глубокую благодарность А. И. Шальникову за постоянный интерес к работе и ценные советы, А. А. Абрикосову за обсуждение результатов, Б. Д. Юрасову и С. А. Яковлеву за техническую помощь.

Институт физических проблем им. С. И. Вавилова  
Академии наук СССР

Поступило  
17 VII 1952

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- А. И. Шальников, ЖЭТФ, 10, 630 (1940). <sup>2</sup> Н. Е. Алексеевский, ЖЭТФ, 10, 1392 (1940). <sup>3</sup> R. Hilsch, Phys. Zs., 9, 492 (1939). <sup>4</sup> Н. В. Заварицкий, ДАН, 82, 229 (1952). <sup>5</sup> Б. Г. Лазарев, И. В. Хоткевич, ЖЭТФ, 18, 807 (1948). <sup>6</sup> В. И. Хоткевич, В. Р. Голик, ЖЭТФ, 20, 427 (1950). <sup>7</sup> Н. В. Заварицкий, ДАН, 85, № 4 (1952). <sup>8</sup> А. А. Абрикосов, ДАН, 86, № 3 (1952).

\* Для образцов таллия, сконденсированных при 80° К, получены подобные результаты.