

В. В. ПУСТОВАЛОВ, В. И. СТАРЦЕВ, В. С. ФОМЕНКО
ЭЛЕКТРОННОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ
В СВЕРХПРОВОДНИКАХ II РОДА

(Представлено академиком И. В. Обреимовым 9 VII 1970)

Если влияние сверхпроводящего перехода на деформирующие напряжения сверхпроводников I рода (Pb, In, Tl, Sn, Hg) изучено довольно широко (см., например, ⁽¹⁻⁴⁾), то на сверхпроводниках II рода это явление исследовалось мало ⁽⁵⁻⁶⁾.

В настоящей работе изучалось влияние перехода из сверхпроводящего в нормальное ($s \rightarrow n$) и сменное состояния ($s \rightarrow m$) и обратного перехода ($n \rightarrow s$ и $m \rightarrow s$) на деформирующие напряжения в сверхпроводниках II рода в сравнении со сверхпроводниками I рода. Специальное внимание было уделено особенностям торможения дислокаций в смешанном состоянии, так как при этом можно изменять торможение дислокаций электронами проводимости, уменьшая или увеличивая внешнее магнитное поле, за счет изменения доли нормальной фазы в образце. Кро-

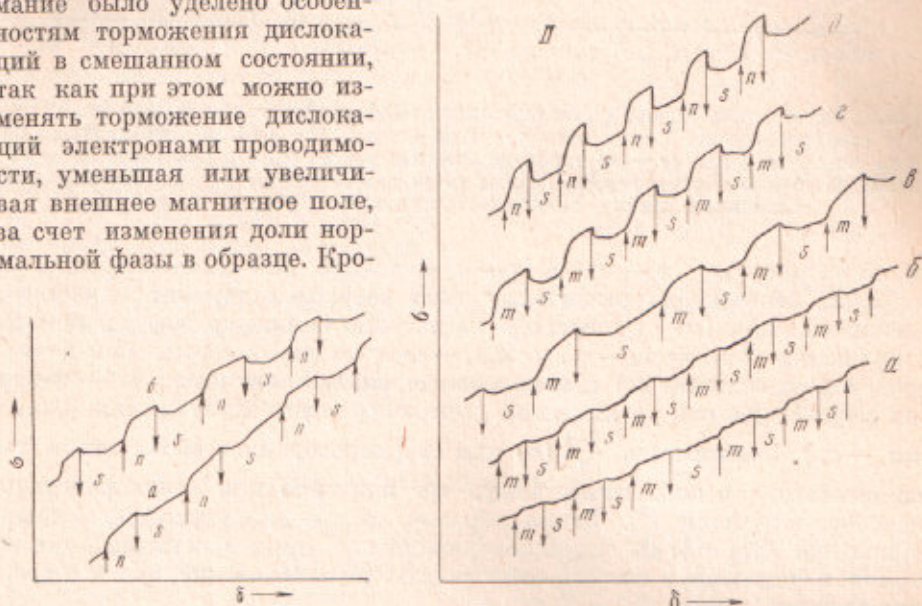


Рис. 1. Участки макроскопических кривых растяжения с многократным изменением состояния поликристаллов In — 3,9 ат. % Pb. I — при разных температурах: а — $T = 2,9^\circ \text{K}$ (сверхпроводник I рода); б — $T = 1,6^\circ \text{K}$ (сверхпроводник II рода). II — при разных величинах магнитного поля: а — $H/H_{c0} = 0,35$; б — 0,45; в — 0,56; г — 0,84; д — $H/H_{c0} = 1,27$.

ме того, в смешанном состоянии может возникать торможение дислокаций за счет их взаимодействия с магнитными вихрями.

Исследование проводилось на сплавах Pb — In с различной концентрацией индия. Чистота исходного свинца 99,9995 %, индия 99,999 %. Материал изготовлялся в вакууме при тщательном перемешивании расплава. Химический анализ полученного таким образом сплава дал хорошее совпадение с исходной концентрацией. Поликристаллические образцы деформировались растяжением на низкотемпературной микромашине

(7) при температуре ниже T_n , состояние образца задавалось полем сверхпроводящего соленоида, окружающего образец. В качестве объекта для сравнительного исследования особенностей скачка деформирующего напряжения при $(n-s)$ - и $(s-n)$ -переходах в сверхпроводниках I и II рода был выбран сплав $\text{In} - 3,9 \text{ ат.}\% \text{ Pb}$. В этом сплаве по измерениям кривой намагничивания и теплопроводности (8) обнаружено существование различного типа сверхпроводимости в разных температурных областях: при $T < 2,25^\circ \text{ K}$ этот сплав — сверхпроводник II рода, при $T > 2,25^\circ$ — сверхпроводник I рода. Таким образом, меняя температуру исследования, можно на одном образце получить два различных типа проводимости.

На рис. 1 (I) представлены типичные участки макроскопических кривых растяжения с многократным изменением состояния поликристаллов $\text{In} - 3,9 \text{ ат.}\% \text{ Pb}$, деформированных при различных температурах. Как

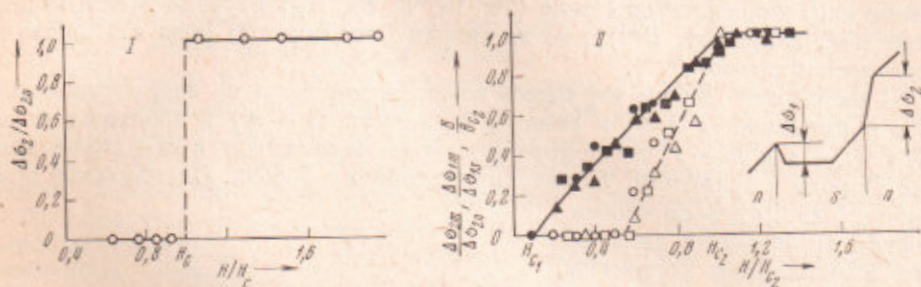


Рис. 2. Зависимость скачка деформирующего напряжения от магнитного поля: I — для сверхпроводника I рода при $(s-n)$ -переходе; II — для сверхпроводника II рода $\Delta\sigma_{2m}/\Delta\sigma_{2n}$ при $(s-m)$ -переходе (черные точки) и $\Delta\sigma_{1m}/\Delta\sigma_{1s}$ при $(m-s)$ -переходе (белые точки); разные формы точек соответствуют различным образцам. Сплошная линия — зависимость индукции B/B_{c2} от поля H/H_{c2} .

видно из рисунка, $(n-s)$ - и $(s-n)$ -переходы для температурных интервалов, отвечающих различному типу сверхпроводимости, качественно одинаковы: при $(n-s)$ -переходе характерно снижение деформирующего напряжения ($\Delta\sigma_{1s} = \sigma_n - \sigma_s$, σ_n и σ_s — напряжения в нормальном и сверхпроводящем состояниях) и появление площадки текучести; $(s-n)$ -переход сопровождается увеличением деформирующего напряжения ($\Delta\sigma_{2n} = \sigma_s - \sigma_n$). Зависимость $\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$ (8) для сверхпроводников обоих типов также одинакова и аналогична тому, что получено при сверхпроводящем переходе на свинце (8). Таким образом, скачок деформирующего напряжения при переходе из сверхпроводящего состояния в нормальное и при обратном переходе в сверхпроводниках II рода такой же, как и в сверхпроводниках I рода.

Изучение скачка деформирующего напряжения в смешанном состоянии в сплаве $\text{In} - 3,9 \text{ ат.}\% \text{ Pb}$ затруднительно в силу того, что его область очень мала (8): $H_{c1} = 299 \text{ э}$, $H_{c2} = 333,5 \text{ э}$. Поэтому был выбран сплав $\text{Pb} - 13 \text{ ат.}\% \text{ In}$, который во всем интервале температур является сверхпроводником II рода с параметрами при $4,2^\circ \text{ K}$: $H_{c1} = 280 \text{ э}$, $H_{c2} = 2400 \text{ э}$.

В процессе деформирования такого сплава образец многократно переводился из сверхпроводящего состояния s в смешанное m , причем магнитное поле менялось от H_{c1} до H_{c2} . Перевод сопровождался увеличением деформирующего напряжения $\Delta\sigma_{2m} = \sigma_m - \sigma_s$ ($(s-m)$ -переход, σ_m — деформирующее напряжение в смешанном состоянии), которое по абсолютной величине всегда было меньше $\Delta\sigma_{2n}$. Это хорошо видно из рис. 1 (II), где приведены макроскопические участки кривых деформирования с многократным переводом образца из одного состояния в другое, но при

различных H/H_{c2} . Отчетливо видно, что по мере роста поля как $\Delta\sigma_{1m}$ ($(m-s)$ -переход), так и $\Delta\sigma_{2m}$ увеличиваются. На рис. 2 дана зависимость $\Delta\sigma_{1m}/\Delta\sigma_{1s}$, $\Delta\sigma_{2m}/\Delta\sigma_{2s}$ от H/H_{c2} . Различие между двумя типами сверхпроводников состоит в том, что в сверхпроводнике первого рода изменение деформирующего напряжения наблюдается при $H \geq H_c$ и происходит резким скачком, а в сверхпроводниках II рода изменение $\Delta\sigma_{2m}/\Delta\sigma_{2s}$ при полях, меньших H_{c1} , равно нулю, а затем линейно растет с увеличением поля от H_{c1} до H_{c2} и достигает насыщения при $H = H_{c2}$. Дальнейший рост поля практически не сказывается на величине $\Delta\sigma_{2m}/\Delta\sigma_{2s}$. На этом же рисунке сплошной линией показано изменение индукции (B/B_{c2}) с изменением поля для сплава Pb — 12 ат. % In *. Это сопоставление показывает, что изменение $\Delta\sigma_{2m}/\Delta\sigma_{2s}$ происходит по тому же закону, что и изменение индукции в сверхпроводнике II рода.

Нужно отметить, что при $(m-s)$ -переходе зависимость скачка деформирующего напряжения от поля имеет несколько другой вид, чем при $(s-m)$ -переходе. Эта зависимость также линейна относительно поля, однако $\Delta\sigma_{1m}/\Delta\sigma_{1s} \neq 0$ при полях, много больших H_{c1} , и не коррелируется с кривой намагничивания.

Тот факт, что при малых полях прирост деформирующего напряжения ($\Delta\sigma_{2m}$) сильно зависит от поля и что эта зависимость такая же, что B/B_{c2} , по-видимому, указывает на преобладающее электронное торможение дислокаций. Различие в зависимостях $\Delta\sigma_{2m}/\Delta\sigma_{2s}$ и $\Delta\sigma_{1m}/\Delta\sigma_{1s}$ от H/H_{c2} может свидетельствовать о различных механизмах, сопровождающих эти переходы, и, по-видимому, электронный механизм торможения полностью характеризует $\Delta\sigma_2$. Об этом свидетельствует измерение температурной зависимости скачка деформирующего напряжения при сверхпроводящем переходе (¹¹).

Однако полностью механизм торможения дислокаций в смешанном состоянии еще не ясен, так как принципиально также возможно торможение дислокаций макроскопическим вихрями. Долю такого торможения в этих опытах определить не удалось.

Авторы благодарны чл.-корр. АН УССР Б. И. Веркину за внимание к работе, Б. Я. Сухаревскому, В. П. Галайко, В. Я. Кравченко, Н. Я. Фогель за полезные дискуссии.

Физико-технический институт низких температур
Академии наук УССР
Харьков

Поступило
8 VII 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. В. Пустовалов, В. И. Старцев, В. С. Фоменко, Препринт Физ.-технич. инст. низких температур АН УССР, Харьков, 1968; ФТТ, 11, № 5, 1282 (1969).
- ² G. A. Alers, O. Buck, B. R. Tittman, Phys. Rev. Lett., 23, № 3, 290 (1969).
- ³ И. А. Глидин, Б. Г. Лазарев и др., ДАН, 188, № 4, 803 (1969).
- ⁴ В. П. Солдатов, В. И. Старцев, Т. И. Вайнблат, Препринт Физ.-технич. инст. низких температур АН УССР, Харьков, 1969; Phys. Stat. Sol., 37, № 1, 47 (1970).
- ⁵ H. Kojima, T. Suzuki, Phys. Rev. Lett., 21, № 13, 896 (1968).
- ⁶ G. Kostorz, Scr. Met., 4, № 2, 95 (1970).
- ⁷ В. В. Пустовалов, Г. С. Медько и др., Приборы и техн. эксп., № 2, 184 (1967).
- ⁸ K. Noto, Sci. Rep. Ritu A, 20, № 4, 129, Sendai, Japan, (1968).
- ⁹ В. В. Пустовалов, В. И. Старцев, В. С. Фоменко, Препринт Физ.-технич. инст. низких температур АН УССР, Харьков, 1969; Phys. Stat. Sol., 37, № 1, 413 (1970).
- ¹⁰ D. E. Farrell, B. S. Chandrasekhar, Phys. Rev., 177, № 2, 694 (1969).
- ¹¹ В. В. Пустовалов, В. С. Фоменко, Письма ЖЭТФ, 12, в. 1, 15 (1970).

* Авторы благодарят В. Г. Волоцкую и Н. Я. Фогель за измерение кривой намагниченности.