

ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ ПЕРЕХОДЕ

В.Л.Инденбом, Ю.З.Эстрин

Обсуждаются динамические механизмы разупрочнения при N - S -переходе, связанные с уменьшением электронного торможения дислокаций, и квазистатические механизмы, обусловленные неоднородностью дислокационной структуры сверхпроводника.

Переход сверхпроводников из нормального (N) в сверхпроводящее (S) состояние при температуре T ниже критической температуры перехода сопровождается скачкообразным повышением их пластичности (разупрочнением) [1 – 3]. Этот эффект наблюдается в различных условиях деформирования, но всегда только на стадии развитой пластической деформации, и его связь с наличием в кристалле подвижных дислокаций не вызывает сомнений. Поэтому естественно, что объяснения разупрочнения основываются на снижении электронного торможения движущихся дислокаций при N - S -переходе. Действительно, величина электронного торможения непосредственно определяет скорость дислокации V при ее вязком надбарьерном движении [4]. Кроме того, V может зависеть от константы вязкого торможения B и в тех случаях, когда подвижность дислокации определяется флуктуационным преодолением локальных барьеров [5]. (Применительно к эффекту разупрочнения анализ этой зависимости был впервые проведен в работе [6]).

Первый случай может реализоваться, когда среднее расстояние L между точками закрепления дислокации превосходит $L_{кр} \approx W/\sigma b^2$, где W – энергия связи дислокации с закрепляющим ее дефектом, σ – заданное напряжение, b – вектор Бюргера. Условием реализации второго случая служит неравенство $L_0 < L < L_{кр}$, где $L_0 \approx ct/B$ – критическая длина, определяющая условие сильного демпфирования, $m \sim \rho b^2$ – масса единицы длины дислокации, ρ – плотность материала, c – скорость звука.

В обоих случаях отношение скоростей дислокации в N и S состояниях обратно отношению констант вязкого электронного торможения:

$$V_N / V_S = B_S / B_N. \quad (1)$$

Соотношение (1) хорошо согласуется с результатами многих экспериментальных работ (см., например, [7]). Однако, имеются данные, которые не могут быть объяснены только на основе (1). В частности, в условиях установившейся ползучести отношение скоростей пластической деформации в S и N состояниях более чем на порядок превосходит отношение B_N / B_S [8].

Поскольку вопрос о механизме повышения пластичности при N - S переходе является дискуссионным, нам представляется целесообразным отметить некоторые обычно упускаемые из виду динамические (свя-

занные с изменением динамического торможения дислокаций) эффекты, не сводящиеся к (1), и указать на возможность квазистатических эффектов.

1. Динамические эффекты, не сводящиеся к вязкости.

Из диффузионной теории преодоления барьера [9] (см. также [6]) следует, что зависимость V от B исчезает, когда L становится меньше L_0 . Повышением концентрации точек закрепления дислокации (например, легированием) можно добиться исчезновения эффекта разупрочнения [10]. Интересно, однако, отметить, что из общей теории диффузионного преодоления барьера [9] следует также переход к линейной зависимости $V(B)$ при крайне низком уровне демпфирования, что соответствует $L \ll c(m/B)(T/Q)$, где Q — энергия активации. Это явление обращает знак эффекта и могло бы привести к упрочнению при N - S превращении, но может оказаться замаскированным другими процессами, приводящими к разупрочнению.

В частности, при низком уровне демпфирования возможен так называемый инерциальный эффект: за счет инерции дислокации при ее набегании на барьер происходит дополнительный прогиб дислокационного сегмента и возникает дополнительная сила, действующая на точки закрепления [11–13], что приводит к эффективному снижению потенциального барьера, различному в N и S состояниях. Инерциальная модель дает температурную зависимость скачка напряжения $\Delta\sigma = \sigma_N - \sigma_S$, удовлетворительно согласующуюся с экспериментальной (см. [14]). Важно подчеркнуть, что инерциальный механизм может проявляться только при напряжениях, близких к напряжению безактивационного отрыва, когда характерное время релаксации m/B составляет заметную долю времени флуктуационного преодоления барьера.

2. Квазистатические эффекты.

Квазистатические механизмы, в отличие от динамических, основаны на учете неоднородности электронной структуры сверхпроводника, связанной с неоднородностью дислокационной структуры, возникающей в результате гетерогенной пластической деформации (полосы скольжения, границы блоков и т. д.). Внутренние напряжения, возникающие при пластическом деформировании, вызывают локальные изменения ширины энергетической щели, сходные с теми, которые возникают при упругом нагружении сверхпроводников [15, 16]. Непосредственное влияние дислокаций на фононный спектр кристалла также приводит к локальным изменениям щели в результате неоднородности дислокационной структуры образца. Наконец, неоднородное распределение дислокаций и точечных дефектов вызывает изменения длины пробега электронов, что, в частности, локально меняет энергию N - S границы.

Все эти эффекты обуславливают пространственную неоднородность сверхпроводящего состояния и повышают плотность свободной энергии в S состоянии на величину $\delta F \sim N(0) \xi_0^2 (\text{grad } \Delta)^2$, где $N(0)$ — плотность состояний на поверхности Ферми, ξ_0 — длина когерентности, Δ — энергетическая щель [17]. Наличие градиентного члена в свободной энергии, связанного с неоднородностью распределения дислокаций, приводит к дополнительной термодинамической силе, стремящейся го-

могенизовать реальную структуру сверхпроводника, разредить дислокационные скопления и т. д. Пересчет этой силы на эффективные механические напряжения σ_{eff} , действующие на дислокацию, дает

$$\sigma_{eff} = \delta F / \delta \epsilon . \quad (2)$$

Здесь $\delta \epsilon$ — деформация, производимая при выравнивании плотности дислокации по кристаллу. При использовании типичных значений параметров сверхпроводников и данных по дислокационной структуре (см., например, [18]) оценка (2) показывает, что напряжения σ_{eff} могут достигать величины порядка 10^5 дин/см^2 . Такие напряжения, будучи малыми по сравнению с приложенным напряжением, являются, тем не менее, существенными в специальных условиях деформирования (например, при истощении числа подвижных дислокаций в условиях ползучести).

Для выяснения сравнительной роли квазистатических и динамических эффектов представляется крайне желательным проведение экспериментов на образцах с различной дислокационной структурой и анализ изменения дислокационной структуры в результате N - S -перехода. Большой интерес представляют опыты по подвижности индивидуальных дислокаций в N и S состояниях, позволяющие исключить квазистатические эффекты.

Институт кристаллографии
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
27 апреля 1973 г.

Литература

- [1] В.Е.Пустовалов, В.И.Старцев, В.С.Фоменко. Препринт ФТИНТ АН УССР, Харьков, 1968; ФТТ, 11, 1382, 1969.
- [2] Н. Kojima, Т. Suzuki. Phys. Rev. Lett., 21, 896, 1968.
- [3] И.А.Гиндин, Б.Г.Лазарев, Я.Д.Стародубов, Е.П.Лебедев. ДАН СССР, 188, 803, 1969.
- [4] М.И.Каганов, В.Д.Нацик. Письма в ЖЭТФ, 11, 550, 1970; ЖЭТФ, 60, 326, 1971.
- [5] V. L. Indenbom, Yu. Z. Estrin. Phys. stat. sol. (a), 4, K37, 1971.
- [6] В.Д.Нацик. ЖЭТФ, 61, 2540, 1971.
- [7] В.С.Бобров, Э.Ю.Гутманас. Письма в ЖЭТФ, 17, 137, 1973.
- [8] V. P. Soldatov, V. I. Startsev, T. I. Vainblat. Phys. stat. sol. 37, 47, 1970.
- [9] H. Kramers. Physica, 7, 284, 1940.
- [10] V. P. Soldatov, V. I. Startsev, T. I. Vainblat, Yu. G. Kazarov. J. Low Temp. Phys, 11, 321, 1973.
- [11] A. V. Granato. Phys. Rev. B4, 2196, 1971.
- [12] Ю.З.Эстрин, В.Л. Инденбом. Доклад на Конференции по физическим механизмам пластической деформации при низких температурах. Харьков, октябрь 1971. В сб. "Физические механизмы пластической деформации при низких температурах" Киев, Наук. думка", 1973 (в печати).

- [13] G.Kostorz. *J. Low Temp. Phys.*, **10**, 169, 1973.
 - [14] T.Suzuki. Technical Report of ISSP, Ser. A, Nr. 544, 1972, Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, Tokyo, Japan.
 - [15] J.H.Davis, M.J.Skove, E.P.Stillwell. *Solid State Comm.*, **4**, 597, 1966.
 - [16] K.Luders. *Z. Phys.*, **193**, 73, 1966.
 - [17] Де Жен. Б Сверхпроводимость металлов и сплавов. Изд. Мир, М., 1968, стр. 174.
 - [18] Т.В.Копетский, М.М.Мышляев, Н.И.Новошатская, Н.А.Тулина, В.А.Юханов. *Phys. stat. sol.*, **16**, 307, 1973.
-