Физика низких температур, 1996, т. 22, № 7, с. 825–827

Подобие эффекта разупрочнения в сверхпроводящем состоянии в ВТСП и НТСП

Б. Г. Лазарев, Я. Д. Стародубов, Г. Г. Сергеева, М. Б. Лазарева, Л. А. Чиркина, В. С. Оковит, Е. В. Карасева, В. А. Фролов, А. В. Чечкин, В. Т. Петренко, М. А. Тихоновский

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Украина, 310108, г. Харьков, ул. Академическая, 1
E-mail:kfti@kfti.kharkov.ua

Статья поступила в редакцию 25 сентября 1995 г., после переработки 14 марта 1996 г.

Для двухфазной висмутовой керамики изучены скорость ползучести, особенности спектра внутреннего трения и сопротивления планарного контакта. Смещение пика в температурной зависимости скорости ползучести и особенностей сопротивления планарного контакта во внешнем магнитном поле свидетельствуют о влиянии на динамику дислокаций изменений в системе свободных носителей заряда в сверхпроводящем состоянии. Полученные результаты подтверждают высказанное ранее предположение о дислокационном механизме разупрочнения керамики в сверхпроводящем состоянии и не противоречат теории БКШ спаривания носителей зарядов.

Для двухфазної вісмутової кераміки вивчено швидкість повзучості, особливості спектра внутрішнього тертя і опору планарного контакту. Зміщення піку на температурній залежності швидкості повзучості та особливостей опору планарного контакту у зовнішньому полі свідчать при вплив змін у системі вільних носіїв заряду на динаміку дислокацій у надпровідному стані. Показано, що отримані результати підтверджують висловлене раніше припушення про дислокаційний механізм знеміцнення кераміки у надпровідному стані та не суперечать теорії БКШ спарювання носіїв заряду.

При изучении свойств сверхпроводников существенным фактором является чистота исследуемого материала. Эксперименты при варьировании чистоты металлов позволили понять природу влияния примеси на свойства низкотемпературных сверхпроводников (НТСП).

В работах [1–10] было обнаружено сильное влияние пе́рехода в сверхпроводящее состояние на динамику дефектов кристаллической решетки металлов и впервые наглядно показана роль электронов проводимости в деформационных процессах и в поглощении энергии колебаний при $T < T_c$. Установлена корреляция между изменениями в системе свободных носителей заряда и в динамике дислокаций. При $T < T_c$ уменьшение электронного торможения дислокаций приводит к значительному росту их скорости (см., например, [11]), к наблюдению эффекта разупрочнения, повышению пластичности и к уменьшению декремента затухания колебаний. Эффект разупрочнения проявляется в изменениях предела текучести и скорости ползучести [2,5–8]. В экспериментах с поликристаллами свинца при $T < T_c$ отмечена нелинейная температурная зависимость скорости ползучести с максимумом при $T \sim 0{,}3T_c$ [9]. При исследовании зависимости декремента затухания δ низкочастотных колебаний (442 Гц) в ниобии от температуры было установлено, что δ в нормальном состоянии почти не зависит от температуры и величина его больше, чем в сверхпроводящем [12].

Существенно, что изменение деформационных процессов и декремента затухания в сверхпроводящем состоянии было обнаружено также и в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) [13–20]. В работах [13,18] показано, что спектры акустической эмиссии иттриевой и висмутовой керамик под нагрузкой изменяются при понижении температуры и в них проявляется микропластичность и наблюдается максимум скорости ползучести при $0{,}3T_c$. Особенности в спектре внутреннего трения и в температурной зависимости сопротивления планарных контактов обсуждаются в [16–19]. Перечисленные выше обстоятельства позволили авторам [19,20] высказать предположение о природе неупругой деформации и поглощения энергии колебаний в ВТСП: в сверхпрово-

© Б. Г. Лазарев, Я. Д. Стародубов, Г. Г. Сергеева, М. Б. Лазарева, Л. А. Чиркина, В. С. Оковит, Е. В. Карасева, В. А. Фролов, А. В. Чечкин, В. Т. Петренко, М. А. Тихоновский, 1996

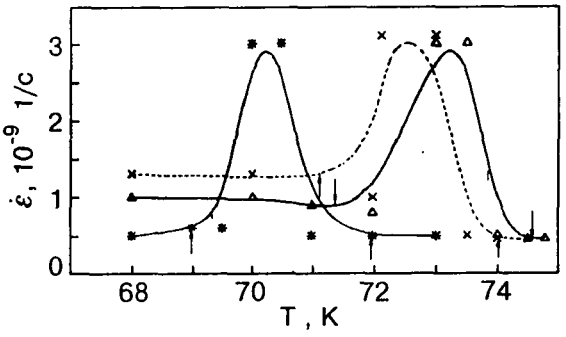

Рис. 1. Температурная зависимость скорости ползучести в полях H, Э: 0 (△); 200 (✕); 800 (*) Стрелками отмечены области значительного увеличения скорости ползучести.

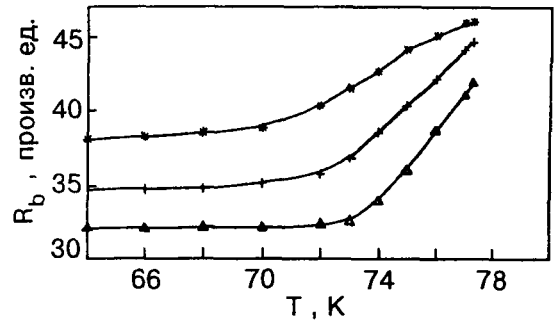

Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления планарного контакта R_b висмутовой керамики в различных магнитных полях H, Э: 0 (△); 200 (✕); 800 (*).

дящем состоянии она так же, как и в НТСП, обусловлена изменением взаимодействия электронной подсистемы со структурными дефектами. В настоящей работе приведены результаты дальнейшего изучения этой проблемы.

Для керамики Bi-Sr-Pb-Ca-Cu-O, полученной по методике работы [19], изучены скорость ползучести, особенности спектра внутреннего трения и сопротивления планарного контакта. Результаты этих исследований не противоречат предположению о дислокационном механизме разупрочнения и поглощения энергии в висмутовой керамике при $T < T_c$.

В дополнение к результатам работы [18] в температурном интервале 65–80 K исследованы особенности скорости ползучести висмутовой керамики, содержащей 90% фазы 2223 и около 10% фазы 2212 (T_c = 106 K). Результаты измерения скорости ползучести $\dot{\varepsilon}$ в условиях одноосного сжатия под действием постоянного напряжения 6 МПа при непрерывном повышении температуры со скоростью 0,2 град/мин приведены на рис. 1. На зависимости $\dot{\varepsilon}(T)$ в области температур 72–74 K имеется пик. Природа этого пика становится ясной после изучения воздействия магнитного поля на $\dot{\varepsilon}$. С увеличением магнитного поля положение максимума пика смещается в область более низких температур. Можно предположить,как и при изучении скорости ползучести в НТСП [9], что такая зависимость $\dot{\varepsilon}(T)$ обусловлена изменением динамики дислокаций при сверхпроводящем переходе фазы 2212: температура сверхпроводящего перехода (86 K) уменьшается в магнитном поле, и максимум $\dot{\varepsilon}(T)$ смещается в область более низких температур.

Информация о температурных изменениях в системе свободных носителей заряда получена с помощью методики планарного контакта, позволяющей исследовать такие изменения при $T < T_c$ [18]. Сущность этого метода состоит в измерении сопротивления барьера Шоттки R_b в контакте керамика-индий в функции от температуры (рис. 2). Резкое изменение наклона кривой $R_b(T)$ наблюдается в такой же области температур, как и для максимумов зависимости $\dot{\varepsilon}(T)$. При воздействии магнитного поля эта особенность на кривой $R_b(T)$ смещается в область более низких температур. Эти результаты подтверждают предположение о влиянии изменений в системе свободных носителей заряда на особенности ползучести при 70–73 K.

На образцах этой же керамики в интервале 4,2–130 K измерена температурная зависимость декремента затухания δ низкочастотных колебаний (0,8 Гц) образцов висмутовой керамики с различным содержанием фазы 2212 [21]. (Экспериментальные условия измерений такие же, как работе [19]). Для однофазной керамики 2223 в нормальном состоянии δ почти не зависит от температуры вплоть до T_c [21, рис. 1, кривая *1*]. В сверхпроводящем состоянии δ уменьшается с понижением температуры до 60 K , затем возрастает и наблюдается максимум декремента затухания при 30 K. Зависимость $\delta(T)$ образца с двумя фазами [21, рис. 1, кривая *2*] находится в качественном согласии с результатами измерений на однофазном образце. Отличие, обусловленное присутствием 10% фазы 2212, состоит в появлении максимума при 70 K, что согласуется с измерениями скорости ползучести.

Чувствительность скорости ползучести и декремента затухания к изменению фазового состава образцов не противоречит теории микроползучести, учитывающей тормозящее влияние диффузионного перемещения пунктов закрепления за движущейся дислокацией и флуктуационный отрыв дислокаций от пунктов закрепления [22]. Электронно-микроскопические исследования подтверж-

дают наличие дислокаций в висмутовых керамиках [23]. Вопрос об их подвижности, к сожалению, пока остается открытым, хотя методики измерения плотности подвижных дислокаций и их скоростей в сверхпроводящем состоянии образцов давно известны [11,24].

Таким образом, результаты, как предыдущие [13,18–20], так и представленные здесь, согласуются с предположением о дислокационном механизме разупрочнения и поглощения энергии низкочастотных колебаний в сверхпроводящем состоянии висмутовой керамики и не противоречат теории БКШ спаривания свободных носителей заряда. Полная аналогия между процессами неупругой деформации в НТСП и ВТСП позволяет использовать эффект влияния сверхпроводящего состояния на динамику структурных дефектов для изучения природы ВТСП.

Работа поддержана Научным советом по проблеме ВТСП и выполнена в рамках проекта «Пластификация» Государственной программы «Высокотемпературная сверхпроводимость», а также Международным научным фондом Сороса (проект № U21L200).

1. J. Bardeen and J. R. Schriefer, in: *Progress in Low Temperature Physics*, C. J. Gortor (ed.) North Holland, Amsterdam **111**, 210 (1961).
2. И. А. Гиндин, Я. Д. Стародубов, *ФММ* **15**, 736 (1963).
3. R. E. Love and R. W. Shaw, *Rev. Mod. Phys.* **34**, 260 (1964).
4. B. P. Tittmam and H. Bommel, *Phys. Rev. Lett.* **14**, 296 (1965).
5. В. В. Пустовалов, В. И. Старцев, В. С. Фоменко, *ФТТ* **11**, 1382 (1969).
6. H. Kojima and T. Suzuki, *Phys. Rev. Lett.* **21**, 896 (1968).
7. И. А. Гиндин, Б. Г. Лазарев, Я. Д. Стародубов, В. П. Лебедев, *ДАН СССР* **188**, 803 (1969).
8. V. V. Pustovalov, V. I. Startsev, and V. S. Fomenko, *Phys. Status Solidi* **37**, 319 (1970).
9. И. А. Гиндин, Б. Г. Лазарев, Я. Д. Стародубов, В. П. Лебедев, *ФММ* **31**, 1043 (1971).
10. М. И. Каганов, В. Я. Кравченко, В. Д. Нацик, *УФН* **111**, 635 (1973).
11. И. В. Карпов, Е. В. Лейко, Э. М. Надгорный, *Письма в ЖЭТФ* **31**, 468 (1980).
12. В. С. Постников, *Внутреннее трение в металлах*, Металлургия, Москва (1974), с. 317.
13. В. С. Бойко, В. М. Горбатенко, Л. Ф. Кривенко, М. Б. Лазарева, В. И. Соколенко, П. А. Хаймович, *ФНТ* **15**, 988 (1989).
14. Н. Н. Песчанская, Б. И. Смирнов, В. В. Шпейзман, П. П. Якушев, *ФТТ* **32**, 271 (1989).
15. В. П. Солдатов, В. Д. Нацик, Н. Ф. Чайковская, *ФТТ* **33**, 1777 (1991).
16. B. Kusz, R. J. Barczinski, M. Gazda, L. Murawski, O. Gzowski, S. Stizza, and I. Davoli, *Physica* **C160**, 25 (1989).
17. L. Sun and Y. Wang, *Phys. Lett.* **A154**, 59 (1991).
18. В. М. Горбатенко, Е. В. Карасева, Л. Ф. Кривенко, М. Б. Лазарева, Я. Д. Стародубов, В. А. Фролов, П. А. Хаймович, *ФНТ* **19**, 217 (1993).
19. М. Б. Лазарева, В. С. Оковит, В. Т. Петренко, Г. Г. Сергеева, Я. Д. Стародубов, М. А. Тихоновский, Л. А. Чиркина, *ФНТ* **20**, 840 (1994).
20. B. G. Lazarev, Ya. D. Starodubov, M. B. Lazareva, G. G. Sergeeva, E. V. Karaseva, V. A. Frolov, L. A. Chirkina, and V. S. Okovit, *Physica* **C235–240**, 1213 (1994).
21. Б. Г. Лазарев, Я. Д. Стародубов, Г. Г. Сергеева, М. Б. Лазарева, Л. А. Чиркина, В. С. Оковит, А. В. Чечкин, В. Т. Петренко, М. А. Тихоновский, *ФНТ* **22**, 819 (1996).
22. Р. А. Варданян, Ю. А. Осипьян, *ЖЭТФ* **94**, 291 (1988).
23. O. Eibl, *Physica* **C168**, 249 (1990).
24. C. S. Pang and J. M. Galligan, *Phys. Rev. Lett.* **43**, 1595 (1979).

The effect similar to that of softening observed in the superconducting state of HTSC and LTSC

B. G. Lazarev, Ya. D. Starodubov, G.G. Sergeeva, M. B. Lazareva, L. A. Chirkina, V. S. Okovit, E. V. Karaseva, V. A. Frolov, A. V. Chechkin, V. T. Petrenko, and M. A. Tikhonovskii

For 2223 and 2212 mixed phases of Bi-ceramics the creep rate, the peculiarities of the intrinsic friction and those of the planar contact resistance are studied. The peaks of the temperature dependences of the creep rate and the planar contact resistance are displaced under magnetic field. That is an indication of the influence of the variations in the free charge carriers system on the dislocation dynamics in superconducting state. These results confirm the supposition as to the dislocation mechanism of the softening effect in superconducting state and do not contradict to the BCS theory of the charge carriers pairing.