

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ СПЕКТР СКОРОСТЕЙ НЕУПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ СИСТЕМЫ Y—Ba—Cu—O

*Н. Н. Песчанская, Б. И. Смирнов, Ю. П. Степанов,
В. В. Шпейзман, П. Н. Якушев*

Температурную зависимость скорости деформации $\dot{\epsilon}$, измеренной через определенное время t после нагружения или после прохождения заданной деформации Δl , мы называем температурным спектром скоростей деформации. В [1, 2] показано, что если нагружение образцов при разных температурах T производить до одних и тех же напряжений σ , составляющих 10—30 % от предела текучести (или разрушающих напряжений), соответствующего максимальной температуре опыта, и выбрать достаточно малые (чтобы не прекратилась деформация) величины t или Δl , например $t=3\div 20$ с или $\Delta l=0.15\div 1$ мкм, то для твердых тел различной природы зависимость $\dot{\epsilon}(T)$ в интервале $77 < T < 300$ К имеет один или несколько максимумов, температуры которых соответствуют различным структурным превращениям в твердом теле (фазовым и релаксационным переходам, границе между хрупким и пластичным разрушением и др.). Эти структурные превращения проявляются в изменении подвижности дефектов структуры, ответственных за деформацию, и приводят к появлению особенностей (как правило, максимумов) на зависимостях $\dot{\epsilon}(T)$.

В настоящей работе измерялись $\dot{\epsilon}$ при одноосном сжатии $\sigma=10$ МПа, в температурном интервале 77—300 К для керамических образцов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, полученных из порошков, приготовленных различными способами. Образцы изготавливались в форме прямоугольных параллелепипедов с размерами от $2\times 2\times 6$ до $4\times 4\times 10$ мм. Температура сверхпроводящего перехода T_c для различных образцов составляла 90—95 К, а электросопротивление в нормальном состоянии вблизи T_c было порядка 10^{-3} Ом·см. Для регистрации скорости деформации применяли методику на основе лазерного интерферометра, что позволяло проводить измерения при очень малых изменениях длины образца ($\Delta l_{\min}=0.15$ мкм) [1-4]. Интерферограмма имела вид синусоиды, частота которой пропорциональна скорости, а число периодов колебаний — величине деформации. После прохождения деформации, необходимой для определения скорости, образец разгружался; затем он нагревался (или охлаждался) до новой температуры, снова нагружался и т. д. Скорость деформации измерялась по интерферограмме при каждой температуре в идентичных условиях — после уменьшения длины образца, вызванной нагружением, на $\Delta l=0.3$ мкм. Использование деформационной, а не временной базы для измерения скорости связано со сложной формой кривой ползучести в области малых напряжений (наличием, в частности, задержки деформации в ряде случаев) [4].

Всего было исследовано шесть керамик. Пять из них имели сверхпроводящий переход, который отчетливо обнаруживался и по температурной зависимости электросопротивления $R(T)$, и по эффекту Мейсснера, и одна керамика, для которой $R(T)$ не претерпевала скачка при $T > 77$ К, но эффект Мейсснера при температуре жидкого азота был заметным. По-видимому, последняя керамика была многофазной и содержала как сверхпроводящую, так и несверхпроводящую фазы. Подтверждением этому служили рентгенодифракционные исследования, которые показали для этой керамики в отличие от других присутствие дополнительных линий на рентгенограммах.

На рисунке приведены типичные спектры неупругой деформации иттриевых керамик. Из шести имеющихся спектров выбраны следующие:

один получен на мелкозернистой керамике, размер зерна 1—3 мкм (кривая 1); другой — на многофазной крупнозернистой керамике, размер зерна 10—30 мкм, $T=300$ К (кривая 4); два спектра (кривые 2, 3) соответствуют однофазным крупнозернистым образцам из разных партий, демонстрирующим при одинаковых T_c и несколько отличающихся плотностях (5.5 г/см³ для образца 2 и 5.8 г/см³ для образца 3) значительные различия в скоростях деформации в максимумах и почти одинаковые температуры самих максимумов. Два спектра, не приведенные на рисунке, были подобны кривым 2 и 3, но с меньшим различием скоростей деформации в максимумах.

Как видно из рисунка, из трех пиков, встречающихся во всех спектрах, наибольшей температурной стабильностью обладает пик при температуре, близкой к T_c , $T_{\max 1} \approx 90$ К. Самый высокотемпературный из обнаруженных максимумов имеет температуру $T_{\max 3} = 250 \div 270$ К. Положение среднего максимума для разных образцов колеблется в более широких пределах: для мелкозернистой керамики $T_{\max 2} = 130$ К, для двух однофазных крупнозернистых $T_{\max 2} = 160$ и 190 К, многофазный образец имеет в том же температурном интервале два максимума — при 120 и 200 К. Трактовка самого факта появления максимумов на зависимости $\dot{\epsilon}(T)$ для различных материалов изложена в [1, 2]. В любом случае максимум означает включение или выключение в той температурной области, где он находится, некоторого механизма, тормозящего деформацию (например, закрепления дислокаций стопорами различной природы). Максимум $\dot{\epsilon}$ вблизи T_c в принципе можно объяснить известным для сверхпроводящих металлов представлением, связывающим ускорение движения дислокаций при переходе в сверхпроводящее состояние выключением электронной составляющей торможения. Это приводит к увеличению частотного множителя в выражении, определяющем скорость термоактивированного отрыва дислокаций от препятствий [5].

Спектры скоростей неупругой деформации при сжатии керамик $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. $\sigma = 10$ МПа.

Первый из обсуждаемых максимумов спектра ($T_{\max 1} \approx 90$ К) проявляется, как видно из рисунка, на всех образцах. Заметим, что к настоящему времени известны аномалии температурных зависимостей вблизи T_c для различных свойств высокотемпературных сверхпроводников: модуля упругости [6–10], декремента колебаний [10, 11], коэффициента линейного расширения [12]. По-видимому, причина перечисленных эффектов и описанного в настоящей работе одна и та же. Аномалии вызваны микропластической деформацией, проходящей в местах, где действуют высокие локальные термоупругие напряжения или напряжения, возникшие под действием внешней нагрузки.

При температурах выше сверхпроводящего перехода также наблюдались особенности в поведении затухания ультразвука, модуля упругости [9, 10], а также теплоемкости (по данным дифференциальной сканирующей калориметрии) [13], которые связываются со структурными изменениями (фазовыми переходами или зарождением и движением двой-

ников вследствие термоупругих напряжений). Полученные нами особенности температурного спектра скоростей деформации качественно совпадают с описанными в [9-13] для характеристик упругости и теплоемкости. Так, $\dot{\epsilon}(T)$ имеет, как правило, две температурные области в интервале $T_c < T < 300$ К, в которых происходят резкие изменения деформационных свойств. Но $\dot{\epsilon}(T)$ имеет и некоторые отличия от результатов акустических измерений, которые, как показано в [11], очень чувствительны к размеру зерна. В наших опытах этого не обнаружено (см. рисунок). Связано это с тем, что в измерениях скорости и затухания ультразвука внешние нагрузки малы, и поэтому велика роль термоупругих напряжений, зависящих при заданной анизотропии коэффициента линейного расширения от размеров зерна. В измерениях скорости деформации напряжения больше (хотя и они далеки от разрушающих), и поэтому роль термоупругих напряжений не столь велика. Следовательно, метод измерения неупругих деформаций дает возможность исследовать дефектную структуру независимо от величины внутренних напряжений.

Таким образом, в работе получены температурные спектры неупругой деформации керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Показано, что в интервале от 77 до 300 К имеются три максимума, соответствующие изменениям подвижности дефектов структуры, ответственных за деформацию. Вероятно, максимум при $T \approx 90$ К связан со сверхпроводящим переходом. Однако вопрос о природе максимумов, о механизме и носителях деформации в обсуждаемых материалах требует дальнейшего изучения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Песчанская Н. Н., Якушев П. Н., Степанов В. А. // ФТТ. 1984. Т. 26. № 4. С. 1202—1204.
- [2] Песчанская Н. Н., Шпейзман В. В., Андреев А. К. и др. // Проблемы прочности. 1987. № 7. С. 115—118.
- [3] Песчанская Н. Н., Пугачев Г. С., Якушев П. Н. // Механика полимеров. 1977. № 2. С. 357—358.
- [4] Песчанская Н. Н., Смирнов Б. И., Шпейзман В. В., Якушев П. Н. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 11. С. 3503—3506.
- [5] Старцев В. И., Ильичев В. Я., Пустовалов В. В. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. М., 1975. 318 с.
- [6] Migliori A., Chen T., Alavi B., Grüner G. // Sol. St. Comm. 1987. V. 63. N 9. P. 827—829.
- [7] Аншукова Н. В., Воробьев Г. П., Головашкин А. И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. № 9. С. 373—375.
- [8] Гайдук А. Л., Жерлицын С. В., Приходько О. Р. и др. // ФНТ. 1988. Т. 14. № 7. С. 718—725.
- [9] Горин Ю. Ф., Нугаева Л. Л., Кобелев Л. Я. и др. // ФММ. 1988. Т. 66. № 1. С. 202—204.
- [10] Пуцин В. Г., Сагарадзе В. В., Фризен Э. Н. и др. // ФММ. 1988. Т. 66. № 1. С. 195—199.
- [11] Буренков Ю. А., Иванов В. И., Лебедев А. Б. и др. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 10. С. 3188—3192.
- [12] Головашкин А. И. // УФН. 1987. Т. 152. № 4. С. 553.
- [13] He J., Zhang B., Lin S. et al. // J. Phys. F. 1987. V. 17. N 10. P. L243—L248.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
10 ноября 1988 г.