

05

## Сдвиговые упругие свойства ВТСП керамики в области перехода в сверхпроводящую фазу

© А.И. Коробов, А.И. Кокшайский, Н.В. Ширгина, Н.И. Одина, А.А. Агафонов, В.В. Ржевский

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119991 Москва, Россия  
e-mail: aikor42@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 сентября 2019 г.  
В окончательной редакции 6 декабря 2019 г.  
Принято к публикации 19 декабря 2019 г.

Приведены результаты исследований сдвиговых упругих свойств высокотемпературной сверхпроводящей (ВТСП) керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в окрестностях фазового перехода в сверхпроводящее состояние при температуре 91.3 К, а также при комнатной температуре 293 К. В области температуры фазового перехода впервые обнаружено локальное увеличение сдвигового нелинейного акустического параметра  $N$ . Проведенные экспериментальные исследования линейных и нелинейных упругих свойств ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в области сверхпроводящего перехода показали, что электронный фазовый переход оказывает существенное влияние на ее упругие свойства. На основе результатов экспериментальных измерений были определены линейные и нелинейные упругие параметры как при комнатной температуре, так и в области температуры фазового перехода.

**Ключевые слова:** скорость ультразвуковых волн, сверхпроводящая керамика, структурная упругая нелинейность, нелинейный сдвиговый упругий параметр.

DOI: 10.21883/JTF.2020.06.49282.309-19

### Введение

Со времени открытия высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) одним из наиболее интенсивно исследуемых материалов является ВТСП соединение  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  [1,2]. Интерес к этому материалу вызван сравнительно высокой температурой фазового перехода  $T_c$ , равной приблизительно 91 К (превышающей температуру жидкого азота  $T = 77.4$  К) в сверхпроводящем состоянии, относительно простой технологией его изготовления, возможностью его применения в различных областях электроники и электроэнергетики, например, при создании магнитных бесконтактных подшипников для накопителей энергии, при изготовлении объемных СВЧ резонаторов, а также при изготовлении электромоторов. Сверхпроводящие магнитные подшипники для быстро вращающихся конструкций, таких как турбины, маховики, двигатели и генераторы, являются одним из наиболее перспективных применений для ВТСП соединения  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  [3]. Керамика  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  представляет собой микрокристаллическую структуру, поэтому при эксплуатации изделий из нее могут возникать различные дефекты, в том числе микротрещины, влияющие на механическую прочность устройств, изготовленных из этой керамики. Вместе с тем существование в керамике  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  ряда фаз и фазовых переходов, зависящих от температуры, от содержания кислорода, неупорядоченности кислородной подрешетки [2,4–8], делает необходимым для изучения ее упругих свойств применение структурно-чувствительных методов. К таким методам относятся измерения коэффициента теплово-

го расширения [9,10], ультразвуковые измерения [11], с помощью которых можно проводить эффективную диагностику ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . Измерения коэффициента теплового расширения керамики в [9,10] проводились рентгеновским методом. Очевидно, что проводить периодическую диагностику промышленных изделий конечных размеров из керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в сверхпроводящем состоянии путем измерения коэффициента теплового расширения представляется довольно трудной задачей. Более перспективными методами неразрушающей диагностики конструкций конечных размеров из ВТСП керамики в сверхпроводящем состоянии являются ультразвуковые методы [12]. Анализ результатов исследований упругих свойств ВТСП керамик [2] показывает, что линейные сдвиговые свойства ВТСП керамик исследованы недостаточно, а исследования нелинейных упругих свойств практически отсутствуют. Особый интерес представляют нелинейные акустические эффекты, возникающие в ВТСП керамике  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  при распространении в ней гармонической сдвиговой акустической волны конечной амплитуды [11]. Проведенные авторами настоящей работы экспериментальные измерения скорости продольных и сдвиговых объемных акустических волн (ОАВ) в исследованных образцах ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  не обнаружили зависимости величины скорости ОАВ от направления распространения в образце. Это указывает на то, что микрокристаллическая керамика  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  является упругоизотропным материалом. Как показано в [7], вследствие высокой симметрии в изотропных твердых телах без дефектов генерация сдвиговой акустической

гармоники запрещена. Однако в изотропных твердых телах кроме классической нелинейности, связанной с ангармонизмом кристаллической решетки, может наблюдаться неклассическая, структурная нелинейность, обусловленная наличием в микрокристаллическом изотропном твердом теле различных дефектов, в том числе микротрещин, при этом структурная нелинейность значительно превышает классическую. Экспериментально установлено, что структурная нелинейность зависит от количества структурных дефектов: с увеличением количества дефектов структурная нелинейность увеличивается. Первая ключевая работа по изучению влияния дефектной структуры на нелинейные упругие свойства поли- и монокристаллов металлов была выполнена в 1963 году на кафедре акустики физического факультета МГУ [13,14]. В этой работе экспериментально наблюдалась генерация второй сдвиговой гармоники в изотропных поликристаллических металлах: алюминии, магниевом-алюминиевом сплаве МА-8. В результате проведенных экспериментов было установлено, что наличие неоднородностей и дефектов (дислокаций, микротрещин, границ микрозерен, локальных внутренних напряжений) существенно изменяет сдвиговые нелинейные упругие свойства твердых тел: в них появляется сдвиговая упругая структурная нелинейность и наблюдается генерация второй сдвиговой гармоники. При этом было отмечено, что с увеличением дефектности материала увеличивается сдвиговая упругая нелинейность в диагностируемом материале. Наличие сдвиговой гармоники упругой нелинейности в материале является диагностическим признаком и свидетельствует о наличии в нем дефектной структуры [11,14], поэтому периодическое измерение второй сдвиговой гармоники в деталях промышленных устройств, изготовленных из керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , находящейся в сверхпроводящем состоянии, позволит получить информацию о накоплении дефектов в этих устройствах.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование линейных и нелинейных сдвиговых упругих свойств ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в сверхпроводящем состоянии, а также при температуре 293 К.

### **Экспериментальные образцы, установка и методика измерений**

Для проведения экспериментальных исследований использовались образцы ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , изготовленные в Национальном исследовательском центре „Курчатовский институт“. Эта керамика используется в промышленных приложениях, например, при изготовлении электромоторов. Из исходной заготовки с пористостью 10% были изготовлены три образца в форме прямоугольных параллелепипедов с размерами  $36.22 \times 9.79 \times 7.19$  mm. Противоположные грани образцов были плоскопараллельны и тщательно полировались. Плотность образцов была равна  $5690 \pm 70$  kg/m<sup>3</sup>.

На рис. 1, а приведена микрофотография образца, полученная с помощью электронного микроскопа с коэффициентом увеличения  $24971 \times$ . На рис. 1, а видно, что образец состоит из микрокристаллов различной формы с характерными размерами порядка  $1-2 \mu\text{m}$ . Также в образце обнаружена пора.

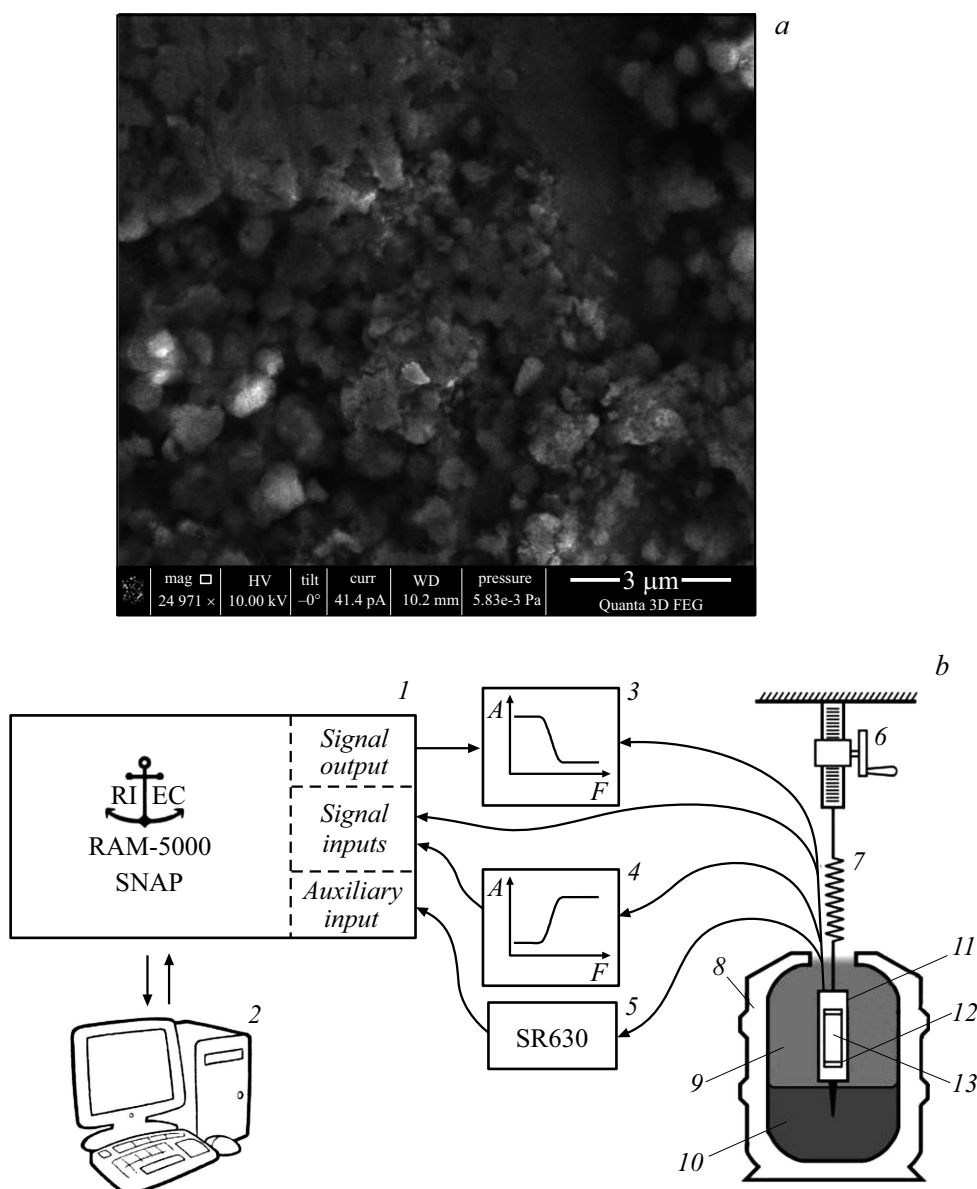
Ультразвуковые измерения в интервале температур от 78 до 300 К проводились с использованием автоматизированной экспериментальной ультразвуковой установки. Установка состоит из персонального компьютера (ПК), ультразвуковой системы Ritec RAM-5000, работающей в импульсном режиме, электрической схемы для измерения сопротивления образца методом четырехточки (на рис. 1 не показана), низкотемпературной термостатируемой акустической ячейки с исследуемым образцом, дьюара с жидким азотом и системы для измерения температуры образца с помощью термопары. Постоянное напряжение, пропорциональное температуре образца, с термопары поступало на контроллер Stanford Research System SR630, и после усиления и оцифровки 12 разрядным аналогоцифровым преобразователем сигнал подавался в ПК.

Акустическая ячейка с экспериментальным образцом опускалась в дьюар с жидким азотом. Ячейка состояла из кристаллодержателя, в котором был закреплен исследуемый образец с термопарой. Кристаллодержатель с образцом помещался в полый герметичный толсто-стенный цилиндр из бронзы. Бронза обладает высокими коэффициентами теплопроводности и теплоемкости, что позволяло предотвратить неоднородность температуры в исследуемом образце. Температура образца изменялась путем плавного перемещения ячейки в парах азота. Скорость изменения температуры во всем диапазоне температур не превышала 0.5 K/min, а в окрестности сверхпроводящего перехода менее 0.1 K/min.

Для одновременного исследования линейных и нелинейных упругих свойств твердых тел в экспериментальной установке были реализованы следующие экспериментальные методики:

- а) импульсный метод измерения скорости и поглощения ультразвуковых волн [15];
- б) спектральный метод для определения нелинейных упругих свойств твердых тел, основанный на исследовании эффективности генерации высших акустических гармоник при распространении акустических волн конечной амплитуды в исследуемом образце [8].

Для возбуждения сдвиговых волн в образце керамики использовалась пластинка из пьезоэлектрического кристалла ниобата лития YZ-17° среза с резонансной чистотой 5 MHz. Для приема сигнала второй упругой сдвиговой гармоники на частоте  $2f = 10$  MHz использовалась аналогичная пластинка с резонансной частотой 10 MHz. Эта пластинка также использовалась и для приема ультразвукового сигнала на частоте 5 MHz. Пластинки крепились к противоположным полированным плоскопараллельным сторонам образца. Акустический



**Рис. 1.** *a* — фотография образца, сделанная на электронном микроскопе; *b* — экспериментальная установка для проведения низкотемпературных акустических измерений: 1 — ультразвуковая система Ritec RAM-5000, 2 — ПК, 3 — фильтр высоких частот, 4 — фильтр низких частот, 5 — многоканальный измеритель температуры Stanford Research System SR630, 6 — ручная лебедка с миллиметровой подачей, 7 — упругая виброразвязка, 8 — сосуд Дьюара, 9 — пары азота, 10 — жидкий азот, 11 — массивная латунная емкость, 12 — пьезоэлектрические преобразователи, 13 — образец.

контакт между пьезоэлектрическими преобразователями и образцом в интервале температур (78–300) К осуществлялся с помощью силиконового масла, обладающего сдвиговой упругостью и незамерзающего при температуре жидкого азота. С ультразвукового измерительного комплекса на излучающий пьезоэлектрический преобразователь подавался высокочастотный импульс с частотой заполнения  $f = 5 \text{ MHz}$  и амплитудой до 500 V, длительностью (3–5)  $\mu\text{s}$ , который возбуждал в образце упругую волну. Прошедшая через образец волна регистрировалась приемным преобразователем. Спектр прошедшего через образец акустического сигнала содер-

жал, кроме сигнала зондирующей волны  $A_f$  на частоте  $f = 5 \text{ MHz}$ , сигнал второй гармоники  $A_{2f}$  на частоте  $2f = 10 \text{ MHz}$ . Для выделения сигналов первой и второй гармоник из спектра акустической волны, прошедшей через образец, применялись фильтры нижних и высоких частот. Отфильтрованные сигналы основной частоты и второй гармоники подавались на отдельные приемные входы ультразвукового комплекса. Это позволяло по двум независимым каналам проводить одновременное измерение амплитуды  $A$  и фазы  $\varphi$  сигналов первой и второй гармоник в зависимости от амплитуды зондирующего сигнала при различных температурах исследуе-

мого образца. Регистрация экспериментальных данных и их последующая математическая обработка осуществлялась в ПК.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

В приготовленных образцах керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  импульсным ультразвуковым методом на прохождение [16] вдоль трех ортогональных направлений, параллельных трем ребрам параллелепипеда, были измерены скорости продольных и сдвиговых объемных акустических волн (ОАВ) при комнатной температуре  $T = 300$  К. Численные значения как для продольных, так и для сдвиговых скоростей ОАВ в образце не зависели от направления распространения ОАВ. Проведенные измерения скорости ОАВ дали возможность считать исследуемые образцы упругоизотропным твердым телом. Также была измерена плотность образцов ВТСП  $\rho_0 = 5690 \pm 70 \text{ kg/m}^3$ . На основании этих измерений были рассчитаны коэффициенты упругости второго порядка в исследованной ВТСП керамике (см. таблицу).

В изотропных твердых телах имеется 12 отличных от нуля коэффициентов упругости второго порядка (КУВП), но только 2 из них являются независимыми. Обычно такими принято считать коэффициенты  $C_{11}$  и  $C_{44}$ . В таблице приведены результаты измерения скоростей продольной и сдвиговой ОАВ, значение плотности керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  и рассчитанные по формулам (1) и (2) значения КУВП в исследованном образце:

$$C_{11} = \rho_0 V_L^2, \quad (1)$$

$$C_{44} = \rho_0 V_T^2, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  — плотность образца,  $V_L$  — продольная скорость,  $V_T$  — сдвиговая скорость ОАВ.

Для описания упругих свойств изотропных твердых тел наряду с тензорными коэффициентами  $C_{11}$  и  $C_{44}$  часто используются скалярные величины:  $\lambda, \mu$  — коэффициенты Ламе,  $S_{ij}$  — модуль податливости второго порядка,  $E$  — модуль Юнга,  $K$  — коэффициент всестороннего сжатия,  $\sigma$  — коэффициент Пуассона. Любая пара этих коэффициентов однозначно описывает упругие свойства твердых тел. Экспериментально определенные коэффициенты  $C_{11}$  и  $C_{44}$  позволили рассчитать коэффициенты Ламе  $\lambda, \mu$ , модуль Юнга  $E$ , коэффициент Пуассона  $\sigma$ , коэффициент всестороннего сжатия  $K$  в ВТСП керамике.

Значение этих коэффициентов в ВТСП керамике приведено в таблице. Методика расчета этих коэффициентов приведена в [17].

Для определения температуры сверхпроводящего перехода из ВТСП керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  был приготовлен образец размером  $1 \times 1 \times 7$  мм. Сопротивление образца  $R$  в интервале температур (78–300) К было

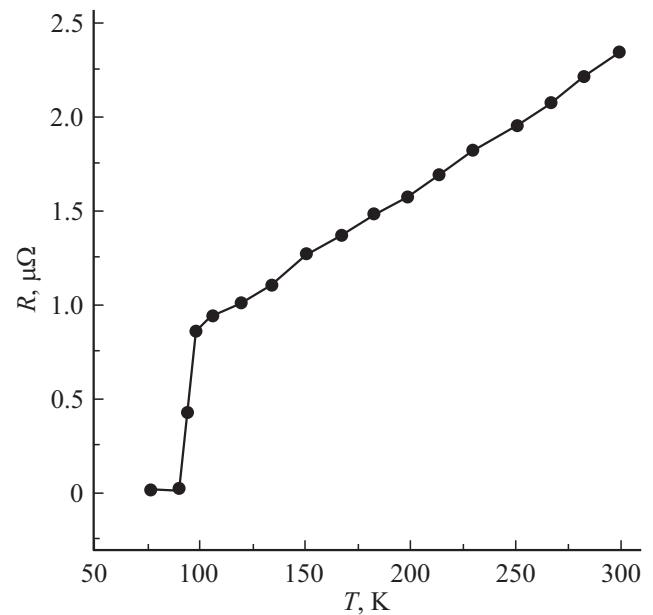


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления образца керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ .

измерено методом четырехточки при токе через образец  $J = 1$  мА. Эти измерения зарегистрировали переход керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  в сверхпроводящее состояние при температуре  $T_c = (91.3 \pm 0.1)$  К (ширина перехода  $\sim 1$  К) (рис. 2).

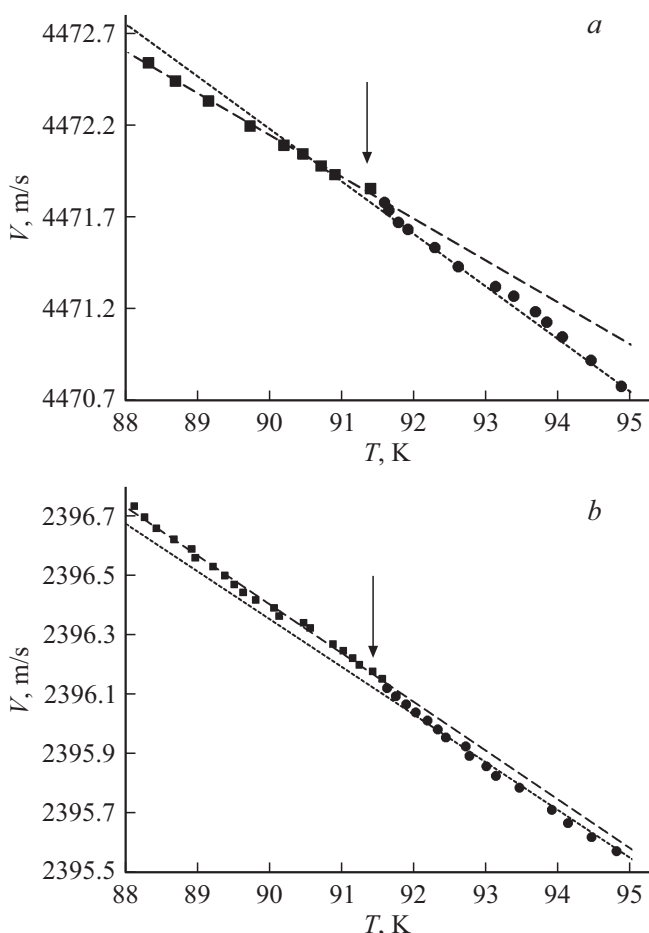
Линейные упругие свойства керамики в интервале температур (79–300) К исследовались импульсным методом путем измерения скорости продольных и сдвиговых ОАВ. С понижением температуры на фоне монотонного роста у скоростей как продольных, так и сдвиговых волн обнаружено anomalous поведение при переходе материала в сверхпроводящее состояние при температуре  $T_c = 91.3$  К. Особенно тщательно нами были измерены температурные зависимости скоростей ОАВ в области сверхпроводящего перехода (рис. 3).

В случае продольных волн при  $T = T_c = 91.3$  К отмечены аномалии как самой зависимости, так и ее производной по температуре (рис. 3). Для оценки величин наблюдаемых скачков скорости кривая зависимости была аппроксимирована отрезками прямых с использованием метода наименьших квадратов на участках выше ( $T = 92.5$ – $94$  К) и ниже ( $T = 88$ – $90$  К) температуры перехода, после чего обе прямые были экстраполированы до точки  $T_c$ . Согласно оценкам, скачок относительного изменения скорости продольной волны  $V_1 \frac{\Delta V_1}{V_1}(T_c) = -1.5 \cdot 10^{-4}$  (рис. 3, а), при этом изменение производной было равно  $\Delta \left[ \frac{d}{dT} \left( \frac{\Delta V_1}{V_1} \right) \right] = 1.3 \cdot 10^{-4} / \text{К}$ .

Для зависимости скорости сдвиговой волны от температуры  $\frac{\Delta V_1}{V_1}(T_c)$ , аппроксимированной аналогично  $\frac{\Delta V_1}{V_1}(T)$ , в пределах ошибки измерений скачка величины  $\frac{\Delta V_1}{V_1}$  не наблюдалось, величина же скач-

Упругие параметры ВТСП керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  при температуре  $T = 300 \text{ K}$ 

Плотность, $\text{kg/m}^3$	$V_L, \text{m/s}$	$V_S, \text{m/s}$	$C_{11}, \text{GPa}$	$C_{44} = \mu, \text{GPa}$	$S_{11}$	$S_{12}$	$K, \text{GPa}$	$E, \text{GPa}$	$\sigma, \text{Pa}$	$\lambda, \text{GPa}$
$5690 \pm 70$	$4530 \pm 70$	$2630 \pm 40$	$116.74 \pm 3.48$	$39.35 \pm 1.18$	$(1.02 \pm 0.03) \cdot 10^{-11}$	$(-2.5 \pm 0.07) \cdot 10^{-12}$	$64.2 \pm 1.9$	$98 \pm 3$	$0.25 \pm 0.07$	$38 \pm 1$



**Рис. 3.** Температурные зависимости продольных (а) и сдвиговых (б) ОАВ в ВТСП керамике  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  в области температуры фазового сверхпроводящего перехода при  $T_c = 91.3 \text{ K}$ .

ка производной при  $T = T_c$  составила (рис. 3, б)  $\Delta \left[ \frac{d}{dT} \left( \frac{\Delta V_i}{V_i} \right) \right] = 1.02 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$ .

Одновременно импульсным методом было исследовано поглощение сдвиговой акустической волны в образце в зависимости от температуры в ВТСП керамике  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  в области фазового перехода. Поглощение упругих волн вычислялось по формуле

$$\alpha = \frac{1}{l} \ln \left( \frac{A_i}{A_{i+1}} \right), \quad (3)$$

где  $l$  — длина образца,  $A_i$  — амплитуда первого прошедшего импульса,  $A_{i+1}$  — амплитуда второго импульса

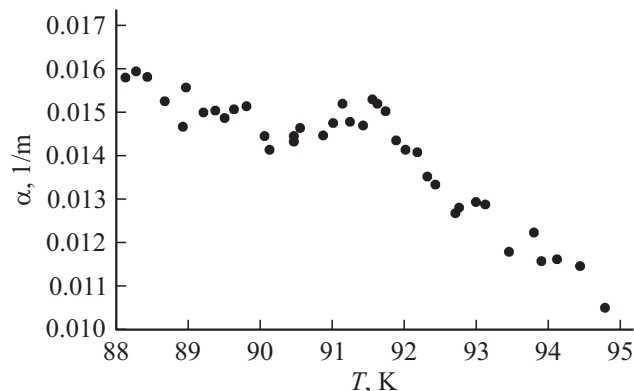
в серии упругих импульсов, прошедших через образец. Измеренная зависимость коэффициента поглощения сдвиговой упругой волны от температуры в окрестности фазового перехода при  $T_c = 91.3 \text{ K}$  приведена на рис. 4. Как видно из приведенной на рис. 4 зависимости, с увеличением температуры наблюдается уменьшение поглощения упругой сдвиговой волны, однако вблизи точки фазового перехода  $91.3 \text{ K}$  наблюдается локальное увеличение коэффициента поглощения с  $0.014$  до  $0.015 \text{ 1/m}$ .

Нелинейные сдвиговые упругие свойства ВТСП керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  в области температуры сверхпроводящего фазового перехода при  $T_c = 91.3 \text{ K}$  исследовались спектральным методом путем измерения эффективности генерации второй сдвиговой упругой гармоники в изучаемой керамике.

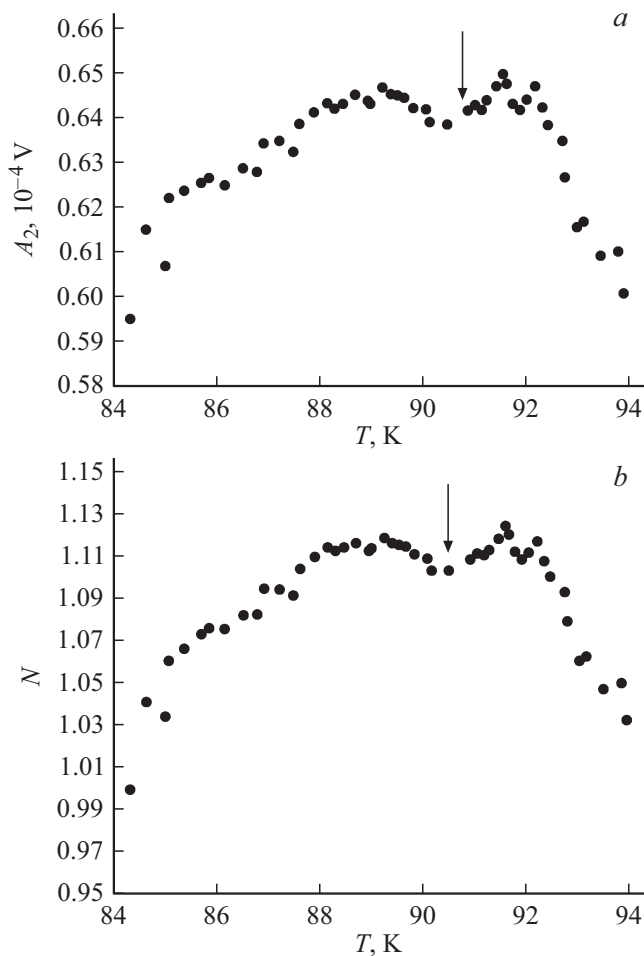
Этот метод заключается в следующем. В спектре гармонической сдвиговой ОАВ конечной амплитуды  $A$ , прошедшей через исследуемый твердотельный образец, кроме волны основной частоты  $A_f = A_1 \sin(\omega t - kl)$ , наблюдалась вторая гармоника ОАВ  $A_{2f} = A_2 \sin[2(\omega t - kl)]$ :

$$A = A_1 \sin(\omega t - kl) + A_2 \sin[2(\omega t - kl)]. \quad (4)$$

Генерация второй сдвиговой гармоники в изотропном образце связана с неклассической структурной нелинейностью, обусловленной наличием в исследуемом образце мелкокристаллической структуры (рис. 1, а). Зависимость амплитуды второй гармоники  $A_2$  от амплитуды ОАВ первой гармоники  $A_1$  в (4) определяется



**Рис. 4.** Температурная зависимость коэффициента поглощения  $\alpha$  для сдвиговых упругих волн от температуры в ВТСП керамике  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  в области температуры сверхпроводящего фазового перехода при  $T_c = 91.3 \text{ K}$ .



**Рис. 5.** Температурные зависимости: *a* — амплитуды второй сдвиговой гармоники  $A_2$ ; *b* — нормированного нелинейного упругого параметра второго порядка  $N(T)$  для сдвиговых упругих волн в ВТСП керамике вблизи температуры сверхпроводящего перехода при  $T_c = 91.3 K$ .

уравнением [13]

$$A_2 = [(Nk^2L)A_1^2]/8, \quad (5)$$

где  $k = \omega/V_T$  — волновой вектор,  $V_T$  — скорость сдвиговой акустической волны,  $\omega$  — частота первой упругой гармоники,  $L$  — длина области взаимодействия,  $N$  — нелинейный акустический параметр для ОАВ в твердом теле. Экспериментальные исследования температурных зависимостей амплитуды второй гармоники  $A_2(T)$  от амплитуды первой гармоники  $A_1(T)$  ОАВ позволяют определить температурную зависимость сдвигового нелинейного акустического параметра  $N(T)$ , численно характеризующего упругую нелинейность образца.

Из уравнения (5) следует

$$N(T) = [8A_2(T)]/[(k_f^2L)A_1^2(T)]. \quad (6)$$

На рис. 5 приведены экспериментальные результаты температурных зависимостей амплитуды второй сдвиговой упругой гармоники и акустического нелинейного

параметра  $N(T)$  для сдвиговых упругих волн второго порядка в области сверхпроводящего перехода при  $T_c = 91.3 K$ , нормированного на его значения при температуре  $84 K$ .

Как следует из рис. 5, в окрестности температуры  $T_c = 91.3 K$ , соответствующей сверхпроводящему фазовому переходу, наблюдалось локальное увеличение сдвигового нелинейного акустического параметра: его величина увеличилась примерно в 1.13 раза.

Увеличение поглощения основной частоты, амплитуды второй сдвиговой упругой гармоник и нелинейного акустического параметра (рис. 4, 5) вблизи температуры фазового перехода  $T_c = 91.3 K$  связаны со структурными изменениями в системе, сопровождающими сверхпроводящий переход. Особенности в поведении коэффициента теплового расширения при температуре фазового перехода были обнаружены в [9,10], которые авторы связывают с изменением структуры образца.

## Заключение

В работе исследованы образцы ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , изготовленной в Национальном исследовательском центре „Курчатовский институт“. Эта керамика используется при изготовлении электромоторов. В ВТСП керамике  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  при температуре  $293 K$  были измерены скорости продольных и сдвиговых волн параллельно ребрам образца. На основании результатов измерений величин скоростей продольных и сдвиговых волн был сделан вывод, что исследуемые образцы являются упруго изотропными. Проведенные измерения скорости ОАВ и плотности образцов позволили определить все независимые компоненты тензоров упругости второго порядка. В интервале температур ( $78-300$ ) K методом четырехточки измерена температурная зависимость сопротивления образца ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . При температуре  $T = 91.3 K$  в исследуемом образце был обнаружен фазовый переход в сверхпроводящее состояние. Несмотря на то, что образец являлся упруго изотропным, в нем наблюдалась генерация второй сдвиговой гармоники, которая связана с микрокристаллической структурой образца. В окрестности температуры фазового перехода впервые обнаружено увеличение сдвигового нелинейного акустического параметра  $N$ , характеризующего нелинейные сдвиговые упругие свойства ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , которое объясняется изменением внутренней структуры образца. Изменение структуры образца ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в области фазового перехода было ранее зарегистрировано при исследовании рентгеновским методом коэффициента теплового расширения в [9,10].

Генерация второй сдвиговой гармоники может служить диагностическим признаком изменения внутренней структуры образца, в том числе появления микротрещин.

Проведенные исследования нелинейных упругих сдвиговых свойств ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  показывают, что они могут быть использованы при неразрушающей акустической диагностике образцов и промышленных деталей из этого материала в сверхпроводящем состоянии методами нелинейной акустики. Достоинство этого метода заключается в том, что он дает возможность проводить непрерывную диагностику конструкций, изготовленных из ВТСП керамики, в процессе их эксплуатации.

Проведенные экспериментальные исследования линейных и нелинейных упругих свойств керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в области сверхпроводящего перехода показывают, что переход в сверхпроводящее состояние оказывает существенное влияние на линейные и нелинейные упругие сдвиговые свойства данного материала.

### Благодарности

Авторы благодарят Круглова В.С. за предоставленные образцы.

### Финансирование работы

Исследования упругих характеристик выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00042).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Wu M.K., Ashburn J.R., Torng C.J., Hor P.H., Meng R.L., Gao L., Huang Z.J., Wang Y.Q., Chu C.W. // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58. N 9. P. 908–910.
- [2] Nikiforov V.N., Bulychev N.A., Rzhetskii V.V. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2016. Vol. 43. N 2. P. 74–79.
- [3] Walter H., Bock J., Frohne Ch., Schippl K., May H., Canders W.R., Kummeth P., Nick W., Neumueller H.-W. // J. Phys.: Conf. Series. 2006. Vol. 43. P. 995–998.
- [4] Galliano P.G., Soga N., Hirao K. // J. Mater. Sci. 1992. Vol. 27. P. 2621–2626.
- [5] Воронов Б.Б., Коробов А.И., Мощалков В.В. // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. 1990. Т. 3. Вып. 12. С. 2733–2744.
- [6] Воронов Б.Б., Коробов А.И. // Физика низких температур. 1991. Т. 17. Вып. 11–12. С. 1573–1576.
- [7] Гаджимагомедов С.Х., Палчаев Д.К., Рабаданов М.Х., Мурлиева Ж.Х., Шабанов Н.С., Палчаев Н.А., Мурлиев Э.К., Эмиров Р.М. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 1. С. 9–16. [Gadjimagomedov S., Palchaev D., Rabadanov M., Murlieva Zh., Shabanov N., Palchaev N., Murliev E.K., Emirov R. // Tech. Phys. Lett. 2016. Vol. 42. P. 4–7. DOI: 10.1134/S1063785016010065]
- [8] Белодедов М.В., Черных С.В. // ЖТФ. 2003. Т. 48. Вып. 2. С. 75–80. [Belodedov M.V., Chernykh S.V. // Tech. Phys. 2003. Vol. 48. N 2. P. 209–214.]
- [9] Головашкин А.И., Данилов В.А., Иваненко О.М., Мицен К.В., Перепечко И.И. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. Вып. 7. С. 273–275.
- [10] Swenson C.A., McCallum R.W., No K. // Phys. Rev. B. 1989. Vol. 40. N 13. P. 8861–8871.
- [11] Руденко О.В. // УФН. 2006. Т. 176. Вып. 1. С. 77–95. [Rudenko O.V. // Phys. Usp. 2006. Vol. 49. N 1. P. 69–87.]
- [12] Hull J.R., Murakami M. Proceedings of the IEEE. 2004. Vol. 92. N 10. P. 1705–1718.
- [13] Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 309 с.
- [14] Гедройц А.А., Зарембо Л.К., Красильников В.А. // ДАН СССР. 1963. Т. 150. С. 515–518.
- [15] Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 307 с. [Truell R., Elbaum C., Chick B. Ultrasonic Methods in Solid State Physics. NY: Academic Press, 1969. 478 p.]
- [16] Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллоакустики. М.: Наука, 1975. 680 с.
- [17] Мэзон У. Физическая акустика. Т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. М.: Мир, 1966. 588 с.