



ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ
И АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

BASIC PROBLEMS OF ENERGY AND RENEWABLE ENERGY

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

SUPERCONDUCTIVITY MATERIALS

Статья поступила в редакцию 03.03.15. Ред. рег. № 2192

The article has entered in publishing office 03.03.15. Ed. reg. No. 2192

УДК 539.67+538.945

МЕТОД ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ И СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

В.Е. Милошенко

Воронежский государственный технический университет

394026 Воронеж, Московский пр., д. 14

Тел.: (473) 246-39-22, факс: (473) 246-32-77, e-mail: Miloshenkove@gmail.com

Заключение совета рецензентов: 07.03.15 Заключение совета экспертов: 11.03.15 Принято к публикации: 15.03.15

В обзоре представлены результаты экспериментальных исследований сверхпроводников, полученных автором с учениками и сотрудниками криогенной лаборатории с помощью основного метода – метода внутреннего трения. Проводится обсуждение обнаруженных физических явлений в рамках предлагаемых моделей, и, как показано в работе, целый ряд из них нашел свое дальнейшее развитие и практическое использование.

Ключевые слова: образец, установка, исследование, затухание звука, частота, сверхпроводимость, магнитное поле, зависимость, модель, обсуждение.

METHOD OF INTERNAL FRICTION AND SUPERCONDUCTIVITY

V.E. Miloshenko

Voronezh State Technical University

14 Moscow ave., Voronezh, 394026, Russia

Tel.: (473) 246-39-22, fax: (473) 246-32-77, e-mail: Miloshenkove@gmail.com

Referred: 07.03.15 Expertise: 11.03.15 Accepted: 15.03.15

In the review are presents the results of experimental studies of superconductors which were obtained by the author with the students and staff of the cryogenic laboratory by basic method of internal friction. Within the proposed model is carried out discussion of the detected physical phenomena. In this paper some of the physical phenomena have the further development and practical application.

Keywords: sample, installation, study, sound attenuation, frequency, superconductivity, magnetic field, dependence, model, discussion.



Владимир Евдокимович
Милошенко
V.E. Miloschenko

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики твердого тела ВГТУ, академик международной Академии холода, руководитель секции «Криогенная техника и машиностроение».

Образование: Воронежский педагогический институт (1961).

Область научных интересов: физика твердого тела, физика и техника сверхпроводимости, электродинамика, высокоточное приборостроение.

Публикации: 250.

Information about the author: DSc in Physics and Mathematics, Professor of the Department of Solid State Physics, Voronezh State Technical University, Academician of the International Academy of Refrigeration, head of Section "Cryogenic Equipment and machinery".

Education: Voronezh Pedagogical Institute (1961).

Research area: solid state physics, physics and technology of superconductivity, electrodynamics, precision instrument.

Publications: 250.

Введение

В первой половине 20 века интенсивно начал развиваться метод внутреннего трения в области инфразвуковых и ультразвуковых частот [1], поэтому в 60-х годах В.С. Постников поставил задачу провести исследования в области звуковых частот и температур от 4,2 до 300 К. Для этого автором была освоена технология создания бесшовных, т.е. неразъемных металлических форм, создан способ передачи информации о положении образца, размещенного в вакуумированном рабочем объеме криостата, в области температур жидкого гелия, разработан способ крепления колеблющегося образца с минимальной перекачкой энергии в держатель, созданы коаксиальная линия передачи высокочастотных сигналов с малым теплоподводом к образцу и возможностью изменения температуры от 1 до 15 К и далее до 300 К. Схема установки представлена в работах [2, 3]. В ней исследуемый образец совместно с ответным неподвижным электродом составляют конденсатор, включаемый в открытый колебательный контур. В дальнейшем установка модернизировалась как в способе крепления образца с изменением его формы, обработки электрического сигнала [4], так и по возможностям [5], где были совмещены задачи измерения величины внутреннего трения (ВТ) Q^{-1} и статический метод измерения пластичности и прочности металлов [6], предложенные В.И. Старцевым и В.В. Пустоваловым. В созданной установке [5] внутреннее трение измерялось в процессе деформации от нуля нагрузки до начала пластичной деформации также в области низких температур. Внесены были и другие конструктивные изменения, см., например, [7].

Результаты и обсуждение

При измерениях внутреннего трения аргументом, как правило, являются частота и температура, поэтому в первых работах были проведены исследования на тантале (фольга толщиной 100 мкм) на частоте собственных колебаний ~ 1 кГц, относительной деформации

($2\div 3$) 10^{-6} в области гелиевых температур, т.е. образец находился в сверхпроводящем состоянии.

Впервые было выявлено аномальное по величине рассеяние энергии колеблющегося образца в области сверхпроводящего ($N-S$) перехода [8]. На зависимости $Q^{-1}(T)$, как видно на рис. 1, наблюдается пик, превосходящий фон на порядок ($Q_{\text{фон}}^{-1} = 1 \cdot 10^{-4}$, а $Q_{\text{max}}^{-1} = 7 \cdot 10^{-4}$), его ширина на полувысоте составляет 0,1 К и он «привязан» к сверхпроводящему $N-S$ переходу.

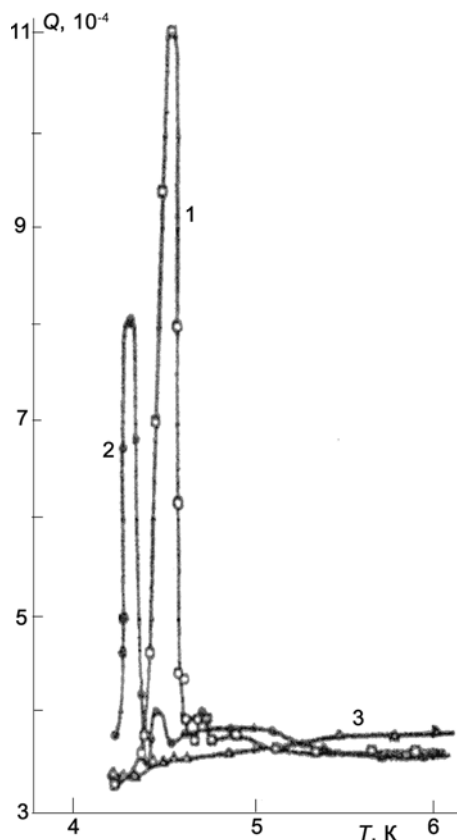


Рис. 1. Температурная зависимость внутреннего трения тантала: кривая 1 – магнитное поле $H_e = 0$; кривая 2 – $H_e < H_K$; кривая 3 – $H_e > H_K$

Fig. 1. The temperature dependence of internal friction tantalum: curve 1 – the magnetic field is $H_e = 0$; curve 2 – $H_e < H_K$; curve 3 – $H_e > H_K$

Изменения структуры кристаллической решетки монокристалла, происходящие за счет деформации прокаткой до 99% и отжига при 1400 К в течение часа, показали следующее: в исходном состоянии наблюдается самый низкий фон Q^{-1} на уровне $5 \cdot 10^{-5}$ и на нем существует ступенька, при которой ВТ в сверхпроводящем состоянии меньше, чем в нормальном. В деформированном же тантале фон увеличился, а пик Q^{-1} становится заметнее. В присутствии магнитного поля, превышающего критическое значение тантала, пика не наблюдается.

Были проведены исследования ряда металлов с ОЦК решеткой, т.е. ниобия и его сплавов, ванадия различной чистоты и состояния кристаллической решетки от совершенного монокристалла до деформированного прокаткой на 99,9% с последующей термической обработкой (см. [9-11]). Показано (рис. 2), что на экспериментальных кривых наблюдаются особенности не только поглощения низкочастотного звука в области фазового перехода и ниже по температуре, но и сопутствующие изменения относительного модуля упругости, как в области сверхпроводящего перехода в этой области температур. Известно, что динамический модуль упругости связан с частотой уравнением

$$E = Af^2, \quad (1)$$

где A – фактор, учитывающий размеры и форму образца, а f – угловая частота его колебаний.

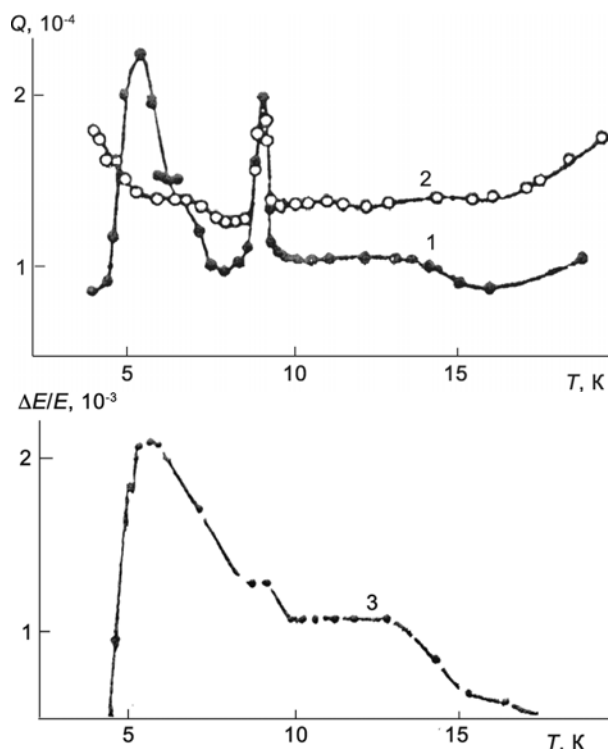


Рис. 2. Влияние чистоты на температурную зависимость внутреннего трения и относительное изменение модуля Юнга. Ниобий чистоты 99,991 % – кривая 1; 99,8% – 2 и 3
Fig. 2. Influence on the purity of the temperature dependence of internal friction and $\Delta E/E$. Niobium purity 99.991% – curve 1; 99.8% – curve 2 and 3

Выражение же для относительного модуля упругости в пренебрежении размерами и формой образца в этом диапазоне температур записывается в виде

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{f_{20}^2 - f_T^2}{f_{20}^2}, \quad (2)$$

где f_{20} – частота колебаний при 20 К.

В качестве примера на рис. 2 представлены результаты исследований $Q^{-1}(T)$ ниобия. Видно, что кроме фазового пика (температура 9,2 К) наблюдается второй максимум при температуре 5,8 К, энергия активации которого, по нашим расчетам, составляет величину 0,0053 эВ. Кроме того, результаты, полученные не только на ванадии [12] со структурой от совершенного моно- до поликристалла на частотах 1 и 10 кГц, но и их модельных сплавах на основе свинца с висмутом, индием в области их фазового перехода, выявили в исследуемом диапазоне частот, что с ростом последней поглощение энергии уменьшается.

Таким образом, можно отметить следующие особенности:

- у всех сверхпроводников в области фазового N - S перехода наблюдается аномально большое затухание звука;

- только на ниобии (в исследуемом интервале температур) существует еще одно заметное затухание, но уже в сверхпроводящем состоянии.

Рассмотрим первую из них:

- ширина пика ВТ в области N - S перехода увеличивается с ростом плотности дислокаций, но она уменьшается с понижением собственной частоты;

- высота пика зависит как от концентрации точечных дефектов (чем выше их концентрация, тем он больше), так и плотности линейных дефектов (чем она больше, тем пик на кривых $Q^{-1}(T)$ выше;

- величина пика зависит и от величины малого магнитного поля, но если поле выше критического, то дополнительное рассеяние энергии не наблюдается.

Относительно последней особенности можно сказать, что она теоретически рассмотрена В.Д. Нациком [13]. В ней существование низкотемпературных пиков ВТ связано с вкладом дислокаций и рассмотрение ведется на основе дислокационных моделей. Внутреннее трение обусловлено релаксационными процессами, которые определяются образованием перегибов на дислокациях и преодолением ими центров закрепления, где основную роль играют квантовые флуктуации.

В основу понимания физической природы наблюдаемого эффекта в области фазового перехода положена модель, предложенная Г.Е. Шуниным [12, 14], где рассмотрено флуктуационное поглощение звука как ниже, так и выше критической температуры (T_K). Полученные результаты для величины внутреннего трения вблизи N - S перехода представлены в следующем виде:

для температуры ниже T_k величина внутреннего трения записывается

$$Q_{(-)}^{-1} \approx \frac{5g_f^2 T^2 n}{144EN^4 \eta^{3/2} \epsilon^{1/2}} \frac{\omega \tau_-}{1 + (\omega \tau_-)^2}, \quad (3)$$

и температур несколько выше T_k :

$$Q_{(+)}^{-1} \approx \frac{g_f T n^2}{24EN^4 \eta^{3/2} \epsilon^{1/2}} \frac{\omega \tau_+}{1 + (\omega \tau_+)^2}, \quad (4)$$

где $\tau_- = \pi/48T\epsilon_-$; $\tau_+ = \pi/32T\epsilon_+$; $\epsilon_- = (T_k - T)/T_k$; $\epsilon_+ = (T - T_k)/T_k$; $g_f^2 = \frac{m}{\pi^4 v_0^2} \left(\ln \frac{\omega_0}{2\pi T} + \frac{\pi v_0}{8T\ell} \right)$; где $n = \pi \ell v_0 / 24T$; v_0 – скорость Ферми; ℓ – длина свободного пробега электрона; m – масса электрона; N – плотность состояний на поверхности Ферми; E – модуль Юнга.

Из анализа уравнений следует, что при $T = T_k(1 - \omega \tau_0)$ существует пик внутреннего трения

$$Q_m^{-1} \approx \frac{g^2 T n^2}{EN^4 \eta^{3/2} \tau_0^{1/2}} \frac{1}{\omega}, \quad (5)$$

где $\tau_0 = \pi/48T$;

как и при $T = T_k(1 + \omega \tau_+)$

$$Q_{+m}^{-1} \approx \frac{g^2 T n^2}{EN^4 \eta^{3/2} \tau_+^{1/2}} \frac{1}{\omega}, \quad (6)$$

где $\tau_+ = \pi/32T$.

Проведенные оценки для ниобия дали величину флуктуационных поправок пика Q_m^{-1} , равную 10^{-4} при температурах как выше, так и ниже T_k , которые зависят от рабочей частоты пропорциональной степени $-1/2$, т.е. $\omega^{-1/2}$, что согласуется с данными эксперимента (рис. 3).

Кроме того, поглощение звука в металлах обусловлено его взаимодействием с электронами проводимости, фононами и дефектами кристаллической решетки. Оценки, сделанные в работе [15], показывают, что в области гелиевых температур фононный вклад мал по сравнению с электронным, но и электронный вклад в области низких частот частот намного меньше экспериментально наблюдаемых величин. Согласно [13] основной вклад в поглощение низкочастотного звука вносит термоактивируемое движение дислокаций. Однако в области сверхпроводящего перехода электронный вклад может аномально увеличиваться из-за флуктуаций параметра порядка, интенсивность которых возрастает вблизи $N-S$ перехода [16].

В завершение этого раздела рассмотрим еще одни интересные результаты, полученные на многослойных структурах тугоплавких и легкоплавких сверхпроводников, например, сплава Pb – 42% Bi, который

образовывал сверхпроводящий (S -слой), а Au или Ag создавали нормальный слой (N -слой), т.е. создавалась структура $S-N-S-N$, а структура $S-D-S-D$ включала диэлектрик (D -слой), которым служил SiO_2 [17].

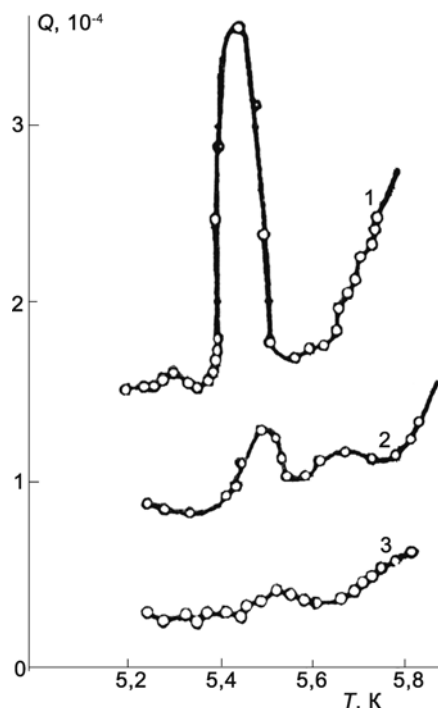


Рис. 3. Температурная зависимость внутреннего трения ванадия (частота 1 кГц): поликристалл (кривая 1), монокристалл (2) и отожженный монокристалл (3)

Fig. 3. Temperature dependence of internal friction of deformed vanadium polycrystal (curve 1); a single crystal (2); annealed single crystal (3)

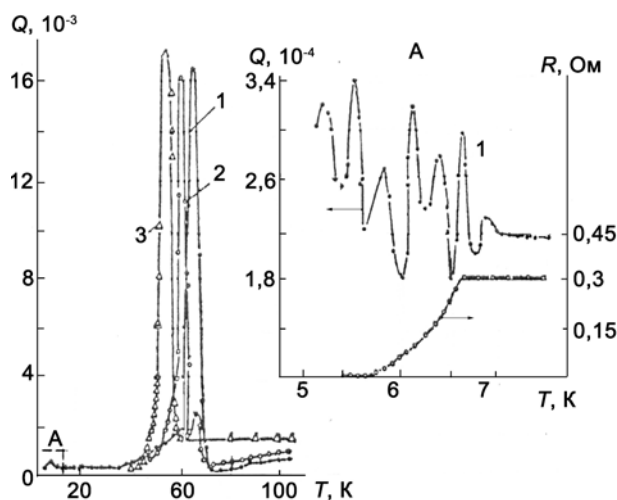


Рис. 4. Температурная зависимость ВТ многослойной структуры $S-N-S-N$:

$f = 1200$ Гц (кривая 1); 750 Гц (2); 400 Гц (3)

Fig. 4. Temperature dependence of the multilayer structure of internal friction $S-N-S-N$:

$f = 1200$ Hz (curve 1); 750 Hz (2); 400 Hz (3)

Эти слои получены термическим напылением в вакууме 10^{-5} торр, толщина каждого S -слоя составляла 500 Å, N -слоя – от 500 до 2700 Å, D -слоя – от 500 до 3000 Å. На рис. 4 показаны характерные результаты исследования S - N многослойных структур. Видно, что в области температур 40-80 К наблюдаются пики типа пиков Бордони [1], а частота следования пиков Q^{-1} (см. рис. 4 на вставке А) представляет большой интерес: они приходятся на область фазового перехода, ширина которого, по данным электросопротивления, составляет всего 0,8 К, в то время как область температур, где наблюдаются аномалии поглощения звука, составляет уже два градуса.

Использование метода

При воздействии внешнего давления на металлы происходят изменения в кристаллической структуре: плотность дислокаций меняется от 10^4 до 10^7 см $^{-2}$ и больше, здесь возможно увеличение концентрации точечных дефектов (вакансий, атомов внедрения и др.), что вызывает изменения величины внутреннего трения в металлах с ГЦК и ОЦК решеткой. Если известны величина фона внутреннего трения металлов (материалов), из которых образована данная конструкция, например, различные покрытия на металле, величина ее внутреннего трения будет отличаться от ВТ каждого из слоев в отдельности и их разность дает сведения о величине адгезии, при этом испытания необходимо проводить при неизменной, например, комнатной температуре, где обычно затухание определяет только фон внутреннего трения. На эту тему получено авторское свидетельство [18]. Автором был предложен метод неразрушающего контроля для медной проволоки методом ВТ, где величина затухания определяется в основном плотностью дислокации, а значит, величина фона ВТ различается у образцов, взятых в начале катушки и ее конце, что определяет механические свойства используемой проволоки как элемента конструкции, а значит, от них зависит надежность будущего прибора, где используются эти элементы [19, 20]. Других способов контроля не было известно (внедрено на предприятии электронной техники).

Сверхпроводники в магнитных полях

В этом разделе представлены результаты исследования тех же сверхпроводников в аналогичных условиях (температура, частота, амплитуда) методом ВТ, но при этом дополнительно включалось изменяемое по величине магнитное поле. Если во время измерений осуществлялось взаимодействие деформирующейся кристаллической решетки с вихрями или вихревой решеткой (случаи 2 и 3 на рис. 7, а), то на исследованных кривых внутреннего трения и относительного изменения частоты ($\Delta f/f_0$) (рис 7, б, в) возникает дополнительное затухание колебаний

сверхпроводника и его частоты, что и определяется магнитоупругостью. В случае, когда образец не деформируется, но он колеблется в том же диапазоне частот (случай 1 на рис. 7, а), то происходит взаимодействие кристаллической решетки с движущейся решеткой вихрей или отдельными вихрями, в результате возникает магнитомеханическая составляющая затухания, и эта ситуация будет рассмотрена позже.

Таким образом, в этом разделе рассмотрены в отдельности наблюдаемые эффекты: магнитоупругие, где на результаты затухания колебаний оказывает влияние колеблющаяся, а значит, деформирующаяся кристаллическая решетка, и те, где такое влияние исключено.

Магнитоупругие эффекты

В проведенных здесь первых экспериментальных исследованиях [21] было выявлено наличие на кривой зависимости $Q^{-1}(H)$ некоторых максимумов. Здесь без аппаратного изменения самого метода внутреннего трения в качестве независимой переменной использовали постоянное, но изменяющееся по величине магнитное поле, а температура и частота были неизменны. Наиболее значимые для изучения природы потерь и интересные результаты, с практической точки зрения, наблюдались на сверхпроводниках второго рода, где проводились исследования влияния изменения ориентации магнитного поля по отношению к большей плоскости образца, от параллельной до перпендикулярной, и изучалось влияние частоты колебаний образца, что представлено на рис. 5 [22]. Выявлено, что происходит уменьшение поглощения энергии упругих колебаний сверхпроводника с ростом частоты в этом диапазоне (видно на рис. 6). Величина пиков $Q^{-1}(H)$ и относительного изменения частоты с ее ростом заметно уменьшаются.

В присутствии магнитного поля существенный вклад в диссипацию энергии в этом случае вносят как реальная кристаллическая решетка, так и джоулевые потери, однако при неизменной температуре в области температур жидкого гелия оба вклада малы по величине, но последний все же доминирует. Аналитическая зависимость для $Q^{-1}(H)$ [23] получена в рамках общей теории магнитоупругости тонких оболочек и пластин с учетом комплексного характера как магнитной проницаемости и проводимости сверхпроводника, так и их зависимости от частоты. В этой феноменологической модели рассматривается область полей, близких к верхнему критическому полю для сверхпроводника второго рода или критическому полю – для первого рода, где приблизительно выполняются условия

$$\mu \leq 1 \text{ и } \sigma \approx \sigma_n f(H), \quad (7)$$

где σ_n – проводимость сверхпроводника в нормальном состоянии, а $f(H)$ учитывает возрастание проводимости при переходе из нормального состояния в смешанное (промежуточное).

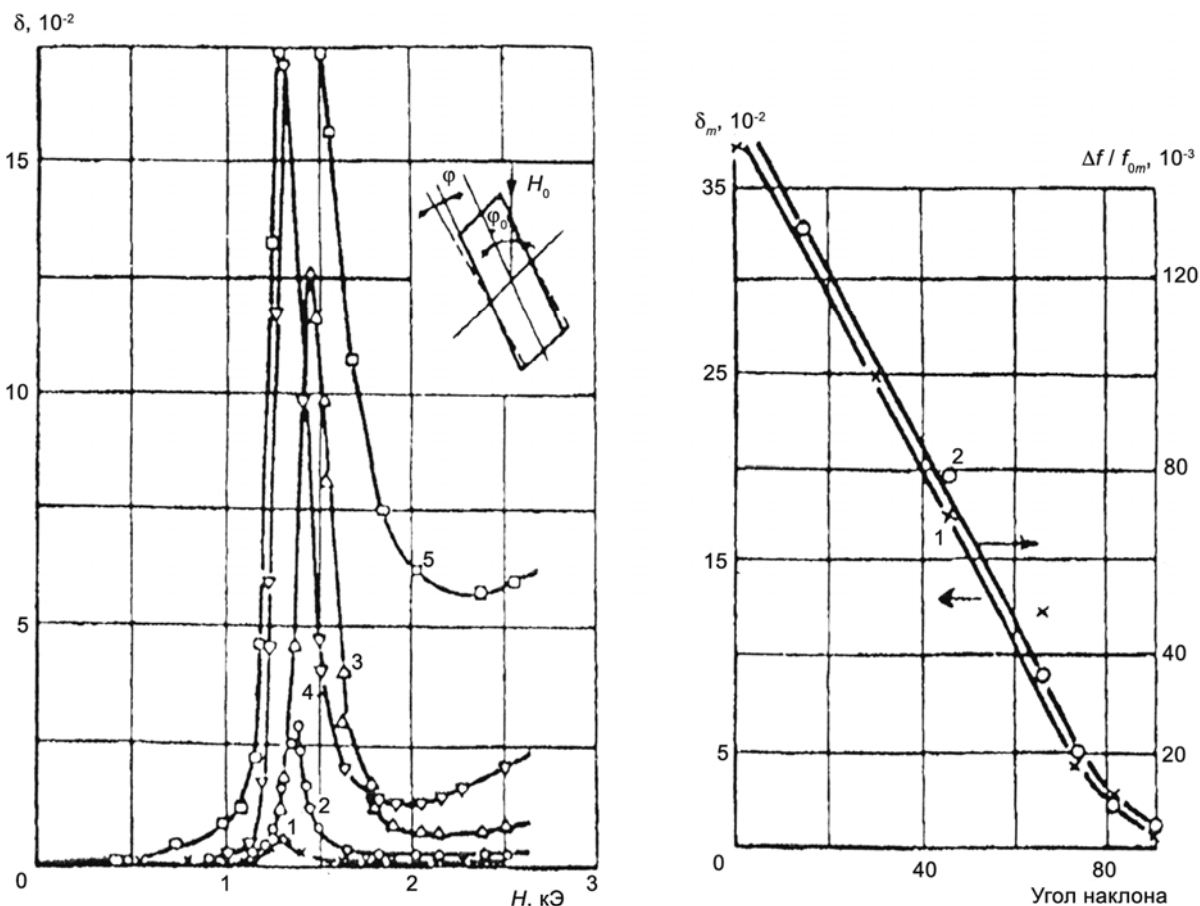


Рис. 5. Влияние ориентации образца в магнитном поле на δ и $\Delta f/f_0$. Ванадий – пленка 100 мкм, $T_k = 5.35$ K, $\gamma = R_{300}/R_{4.2} = 24.5$: угол наклона 90 град (кривая 1); 75 – (2); 60 – (3); 45 – (4); 30 – (5)

Fig. 5. Influence of the orientation of the sample in a magnetic field on δ and $\Delta f/f_0$. Vanadium – 100 micron film, $T_k = 5.35$ K, $\gamma = R_{300}/R_{4.2} = 24.5$: angle 90 degrees (curve 1); 75 – (2); 60 – (3); 45 – (4); 30 – (5)

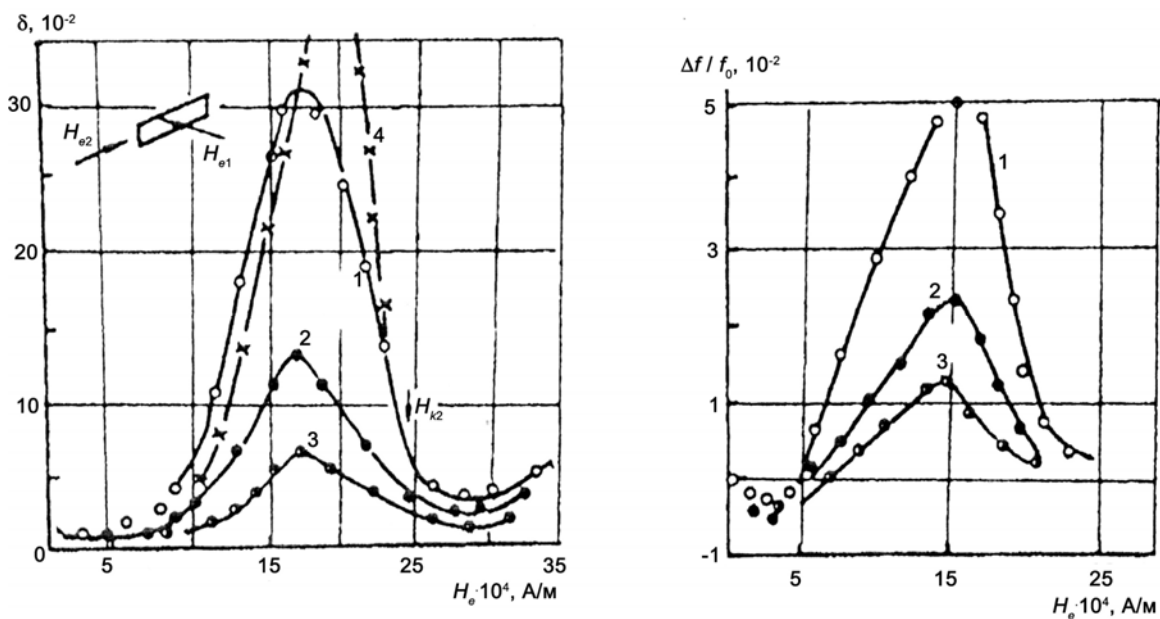


Рис. 6. Влияние частоты на полеую зависимость δ и $\Delta f/f_0$ ниобия:
 $f = 340$ Гц (кривая 1); 511 Гц – (2); 1132 Гц – (3); поле $H_{e1} \perp S$ – (1, 2, 3); $H_{e1} \parallel S$ – (4)

Fig. 6. Effect of frequency on the field dependence of δ and $\Delta f/f_0$ niobium:
 $f = 340$ Hz – (curve 1); 511 Hz – (2); 1132 Hz – (3); field $H_{e1} \perp S$ – (1, 2, 3); $H_{e1} \parallel S$ – (4)

Кроме того, считается, что модуль перенормировки комплексной частоты благодаря магнитоупругому взаимодействию намного меньше частоты собственных колебаний в отсутствие магнитного поля. В линейном по $\Delta\omega$ приближении с учетом (7) получено выражение

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{H^2 K}{8\pi\rho d\omega_0^2} \frac{i\omega_0\tau}{1+i\omega_0\tau}, \quad (8)$$

где $\omega_0^2 = (D/2\pi d)K^4$; $K = \pi/\lambda$; λ – длина полуволны; ω – циклическая частота; ρ – плотность материала; $\tau = 4\pi d\sigma/(c^2 K)$; c – скорость света; $D = \frac{2d^3 E}{3(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость; d – полутолщина образца; ν – коэффициент Пуассона.

Отсюда можно найти величину внутреннего трения:

$$Q^{-1} = \frac{2Jm\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{H^2 K}{4\pi\rho d\omega_0^2} \frac{\omega_0\tau}{1+(\omega_0\tau)^2} \quad (9)$$

и относительное изменение частоты:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\text{Re } \Delta\omega}{\omega_0} = \frac{H^2 K}{8\pi\rho d\omega_0^2} \frac{(\omega_0\tau)^2}{1+(\omega_0\tau)^2}. \quad (10)$$

Если в нормальном состоянии сверхпроводника выполняется условие $\omega\tau_0 \ll 1$, то при $\omega\tau = 1$ внутреннее трение проходит через максимум, равный

$$Q_m^{-1} = \frac{H^2 K}{4\pi\rho d\omega_0^2}; \quad (11)$$

в магнитных полях, когда проводимость сверхпроводника $\sigma \rightarrow \infty$ и $Q^{-1} \rightarrow 0$, относительное изменение частоты определяется формулой

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{H^2 K}{8\pi\sigma d\omega_0^2}. \quad (12)$$

Сопоставление теоретических результатов с экспериментальными, как показано в [23], дало их качественное согласие. Эта модель хорошо зарекомендовала себя также для нормальных металлов [23], где значения Q^{-1} и Δf зависят от количества дефектов, частоты колебаний образца, а величина этих параметров пропорциональна квадрату частоты [15], как и у других сверхпроводников. В этом направлении был проведен широкий комплекс исследований, например, в [22] и других работах. Так, впервые в [24] при исследованиях ниобия и сплава $\text{Rb}_{1-x}\text{In}_x$ было обнаружено существование в области малых магнитных полей барьера проникновению магнитного поля в их объем. Позже выяснилось, что и в высокотемпературных сверхпроводниках [25-26] существует подобный барьер, созданный дефектами приповерхностного слоя, который отличается от известного барьера Бина – Ливингстона.

В работах [27, 28] предложено разделить вклады в наблюдаемое дополнительное затухание низкочастотного звука отдельно на упругорелаксационные и магнитоупругие в зависимости от физической природы: в одном случае на те, где проявляется действие кристаллической решетки и оно связано с частотой и температурой – собственно внутреннее трение, его принято обозначать символом Q^{-1} или δ [1], во втором – где проявляется результат действия джоулевых потерь, но его по названию метода внутреннего трения продолжают в литературе обозначать символом Q^{-1} , однако необходимо его обозначать другим символом, возможно Γ .

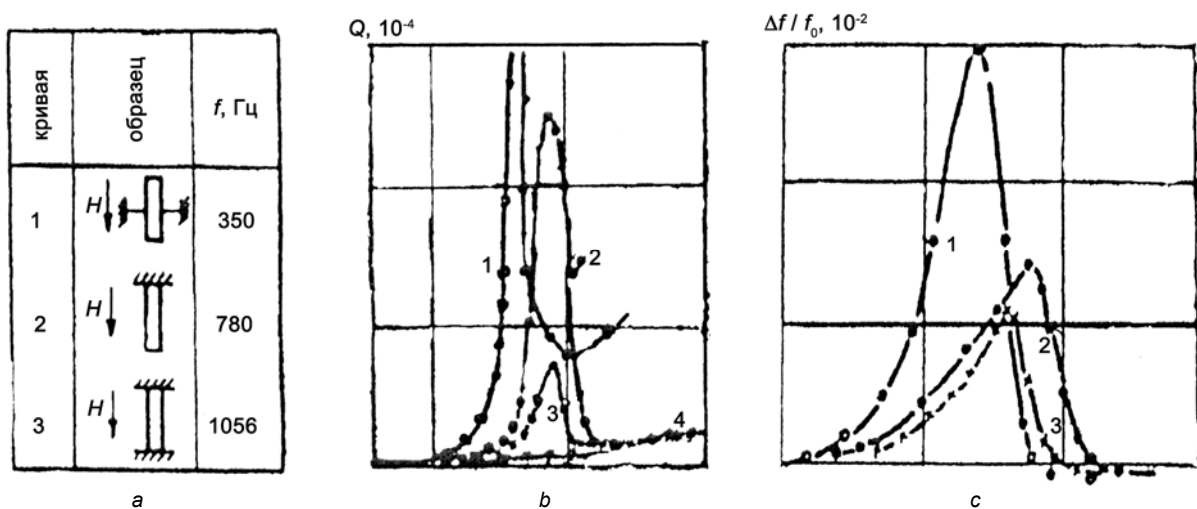


Рис. 7. Влияние способа крепления образца (а) на полевые зависимости внутреннего трения (б) и относительное изменение частоты (с). Ванадий – пленка 100 мкм, $T_K = 5,35$ К, $\gamma = R_{300}/R_{4,2} = 24,5$
 Fig. 7. Influence of the way of fixing the sample (a) on the field dependence of the internal friction (b) and $\Delta f/f_0$ (c). Vanadium – 100 micron film, $T_K = 5.35$ K, $\gamma = R_{300}/R_{4,2} = 24.5$

Это относится и к результатам, полученным различными способами закрепления образца, в том числе на свободнодвижущихся сверхпроводниках. Нами были проведены сравнительные экспериментальные исследования на одном и том же сверхпроводнике – пленках ванадия на частотах от 300 до 1000 Гц, но с различным способом крепления образца (показано на рис. 7 [29]). На графиках видно существование пика затухания колебаний образца в областях малых магнитных полей $H_e = (10-14) \cdot 10^{-4}$ А/м, это говорит о том, что оно проявляется при любом из используемых способов крепления образца, т.е. деформируется ли он, как в [23, 30], или деформацию воспринимает подвеска [29] (случай 1).

Магнитомеханические эффекты. Результаты и использование

Прежде всего, отметим, что результаты исследований, проведенные другими методами (например, [31, 32]), здесь не рассматриваются, т.к. выходят за пределы тематики статьи. В первых работах [22, 24] на сверхпроводниках второго рода (пленки толщиной 100 мкм) при рабочей частоте исследований 350 Гц образцы закреплены на струне из диамагнетика, изучалось их поведение в постоянном магнитном поле. В работе ([29]) дан сравнительный анализ ситуации, возникающей в разных случаях (рис. 7, а): 1 – образец не деформируется, а упругие колебания воспринимает струна–держатель, а характер кривых Q^{-1} ($\delta = \pi Q^{-1}$) и $\Delta f/f_0$ практически одинаков: кривые проходят через максимум при достижении магнитным полем некой величины, которая зависит от ряда причин, например, угла наклона (ϕ) вектора напряженности магнитного поля к большей грани образца, практически линейно (чем больше угол ϕ , тем меньше δ_m).

Наиболее интересные результаты проявляются в характере кривой зависимости $\delta(H)$ и $\Delta f/f_0(H)$, как показано на рис. 5; где в области изменений ϕ в пределах от 45 до 90 угловых градусов на графической кривой этой зависимости наблюдался провал (частота меняла знак), и только в области больших полей появлялся максимум другого знака. Такой характер кривой определяется сменой механизма рассеяния энергии в магнитном поле.

В криогенной лаборатории, где проводились исследования, была теоретически рассмотрена эта экспериментальная ситуация [33]. Отклик смешанного состояния сверхпроводника на возникновение переменной составляющей, наводимой на поверхности колеблющегося образца, описывается феноменологически уравнениями Максвелла и моделью Готтлмана-Розенблюма [34]. В рамках предложенной модели комплексной магнитной поляризуемости [33] были получены зависимости

$$\delta = \frac{\pi H_e^2 V}{8 I \omega_0^2} \alpha_x''; \quad (13)$$

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{V H_e^2}{2 I \omega_0^2} \left(-\alpha_x' + \frac{M_0(H_e)}{H_e} \right), \quad (14)$$

где V – объем образца; I – момент его инерции; $M_0(H)$ – статическая намагниченность пластины; α_{ij} – тензор магнитной поляризуемости, где действительная часть α_{ij}' характеризует проникновение поля в сверхпроводник, а мнимая α_{ij}'' определяет диссипацию энергии.

Учитывая, что $\alpha_{ij} = \alpha_{ij}' + i \alpha_{ij}''$ и $\mu = 1 + 4\pi \alpha_x$, в модели получена связь величины α_{ij} с комплексной проводимостью и магнитной проницаемостью сверхпроводника вдоль оси X в низкочастотном пределе $|qd| \ll 1$:

$$\alpha_x' = -\frac{\sigma_2 \omega d^2}{3c^2}; \quad (15)$$

$$\alpha_x'' = -\frac{\sigma_1 \omega d^2}{3c}, \quad (16)$$

где q – волновой вектор; d – полутолщина образца; σ_1 и σ_2 действительная и мнимая части комплексной проводимости.

Для сверхпроводника второго рода в смешанном состоянии найдено выражение для проводимости (σ_f):

$$\sigma_f = \sigma_n \frac{H_{c2}^2}{H_e^2} \left(1 + i \frac{\omega_p}{\omega} \right), \quad (17)$$

где σ_n – проводимость в нормальном состоянии; ω_p – пиннинговая частота.

Отсюда следует, что σ_2 уменьшается с ростом частоты. Критическая частота ω_p , при которой пиннинг перестает влиять на сопротивление сверхпроводника, можно определить из выражения

$$\omega_p = \frac{2\pi^2 f_0}{\delta} \left[\frac{V H_e^2}{8\pi^2 I f_0^2} \left(\frac{1}{4\pi} + \frac{M_0(H_e)}{H_e} \right) - \frac{\Delta f}{f_0} \right]. \quad (18)$$

Оценки дают значение $\omega_p = 10^3 - 10^4$ Гц.

Экспериментальные исследования проведены на сверхпроводящем сплаве Pb–In с различным содержанием компонент (5 ат. % In, 10 ат. % In и др). Зависимости $\delta(H)$ и $\Delta f/f_0(H)$ получены в различных условиях: изменения ориентации образца в магнитном поле, в сверхпроводящем и нормальном состояниях, а также измерена их намагниченность. Из известных результатов для ω и $\phi(t)$ получены (13) и (14). Таким образом, комплексная магнитная поляризуемость может быть определена из измерений частоты колебаний, логарифмического коэффициента затухания и намагниченности.



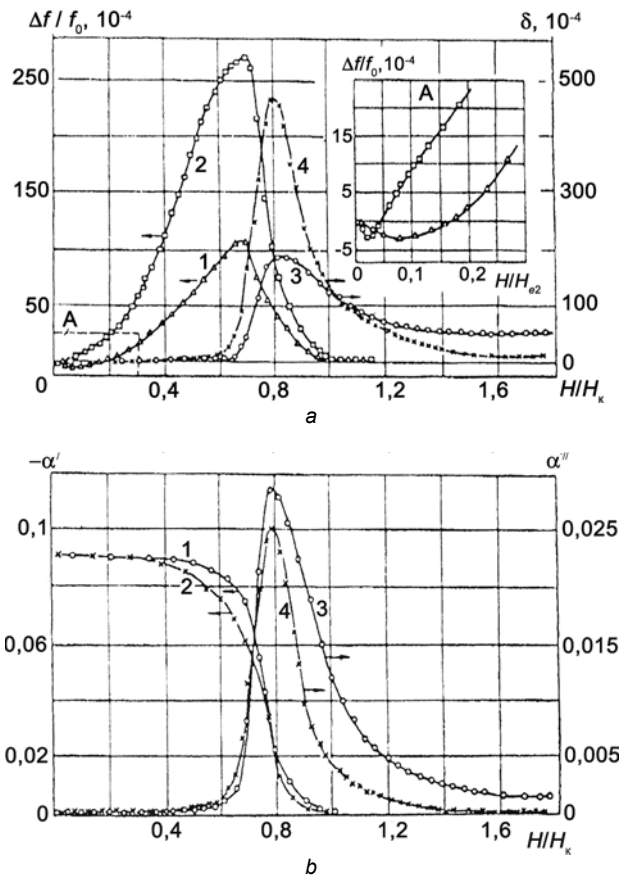


Рис. 8. Влияние магнитного поля на декремент затухания и относительное изменение частоты. Сплавы: Pb – 5% In – (кривая 1 и 3); Pb – 10% In – (2 и 4); а – эксперимент; б – расчет

Fig. 8. Effect of magnetic field on the damping rate (δ) and $\Delta f/f_0$: alloys Pb – 5% In – (curve 1 and 3); Pb – 10% In – (2 and 4); а – experiment; б – calculation

Из рассчитанных в [35] значений α' и α'' , как видно на рис. 8, зависимость $\alpha'(H/H_{k2})$, характеризующая степень проникновения переменного магнитного поля в сверхпроводник, изменяется монотонно, а в области

магнитных полей, где $H/H_{k2} \rightarrow 1$, значения α' и α'_N совпадают. Мнимая составляющая α'' , характеризующая потери в сверхпроводнике в переменном поле, как видно из рис. 8, при $H/H_{k2} \sim 0,8$ проходит через максимум, величина которого примерно равна 0,025, а при $H/H_{k2} \sim 1,65$ значения α'' соответствуют нормальному состоянию. По известным данным можно также оценить и величину потерь за период. Таким образом, этот метод, в котором используются крутильные колебания, является эффективным средством не только исследования потерь, но и средством изучения характера проникновения поля в сверхпроводник, а также позволяет определить ряд параметров сверхпроводника [36]. Кроме того, в работе [37] предлагается способ измерения критических магнитных полей сверхпроводника методом внутреннего трения, в котором по характерным изменениям частоты определяют величину H_{k1} и H_{k2} . Наконец, этот метод можно использовать для определения содержания примесей, например, кислорода в ниобии [38], и в этом случае его используют как метод неразрушающего контроля.

Заключение

В работе на примере простейшей, на первый взгляд, задачи для аспиранта возникло и развилось научное направление, над которым впоследствии работала целая группа исследователей криогенной лаборатории политехнического института. По результатам исследований опубликовано более двухсот работ. Достигнуто понимание природы поглощения низкочастотного звука не только в области фазового $N-S$ перехода, но и гелиевых температур вообще классических сверхпроводников, найдены и технические решения при реализации проведенных исследований, построены физические модели, получены акты внедрения в промышленность и в учебный процесс подготовки инженеров, в частности, специальности «Техника и физика низких температур».

Список литературы

1. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. М.: Металлургия, 1969.
2. Милошенко В.Е., Золотухин И.В., Постников В.С. Установка для измерения внутреннего трения и электросопротивления тонких фольг в интервале температур 4,2÷300 К // Приборы и техника эксперимента. 1972. № 1. С. 218-220.
3. Постников В.С., Милошенко В.Е., Золотухин И.В. Измерение внутреннего трения в металлических пленках и фольгах в диапазоне температур 4,2÷300 К // Физика и химия обработки материалов. 1972. № 3. С. 143-145.

References

1. Postnikov V.S. Vnutrennee trenie v metallah. M.: Metallurgii, 1969.
2. Milošenko V.E., Zolotuhin I.V., Postnikov V.S. Ustanovka dlâ izmereniâ vnutrennego treniâ i êlektrosoprotivleniâ tonkih fol'g v intervale temperatur 4,2÷300 K // Pribory i tehnika êksperimenta. 1972. № 1. S. 218-220.
3. Postnikov V.S., Milošenko V.E., Zolotuhin I.V. Izmerenie vnutrennego treniâ v metalličeskikh plenkah i fol'gah v diapazone temperatur 4,2÷300 K // Fizika i himiâ obrabotki materialov. 1972. № 3. S. 143-145.

4. Голев И.М., Милошенко В.Е. Установка для измерения внутреннего трения металлов в токовом состоянии при температуре $4,2 \pm 300$ К // Приборы и техника эксперимента. 1988. № 5. С. 215-217.

5. Постников В.С., Сафонов И.А., Золотухин И.В., Милошенко В.Е. Установка для измерения внутреннего трения пленок в процессе пластической деформации в интервале температур $4,2 \pm 300$ К // Приборы и техника эксперимента. 1977. № 5. С. 184-186.

6. Пустовалов В.В. Методы изучения пластичности и прочности твердых тел при низких температурах. Киев: Наукова думка, 1971.

7. Милошенко В.Е., Гольтер А.Э. Низкочастотное устройство для измерения внутреннего трения в тонких металлических пластинах. В кн.: 21^е совещание по физике низких температур, ч. IV. Харьков, 1980. С. 319-320.

8. Постников В.С., Золотухин И.В., Милошенко В.Е. Влияние сверхпроводящего перехода на внутреннее трение тантала // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 13. С. 10-13.

9. Милошенко В.Е., Шухалов Е.И. Влияние структуры на внутреннее трение тантала при N-S переходе // ФНТ. 1976. Т. 2, № 10. С. 1480-1482.

10. Постников В.С., Золотухин И.В., Милошенко В.Е. Внутреннее трение и относительный модуль упругости ниобия в нормальном и сверхпроводящем состоянии // ФТТ. 1972. Т. 14. С. 940-942.

11. Савицкий Е.М., Постников В.С., Золотухин И.В., Милошенко В.Е., Барон В.В., Бычкова М.И. Влияние сверхпроводящего перехода на внутреннее трение и относительный модуль упругости сплавов системы ниобий-титан. В кн.: Сплавы редких металлов с особыми физическими свойствами. М.: Наука, 1974. С. 31-35.

12. Postnikov V.S., Zolotukhin I.V., Miloshenko V.E., Shunin G.E. On mechanism of attenuation sound oscillations in films at superconduction transition. In book: Internal friction and ultrasonics attenuation in crystalline solids. Vol. I. Berlin-Yew-York, 1975. P. 137-150.

13. Нацик В.Д. О низкочастотном внутреннем трении в сверхпроводниках // ФТТ. 1974. Т. 16, вып. 2. С. 526-531.

14. Шунин Г.Е. Механизмы внутреннего трения металлов в области сверхпроводящего перехода. Дис. канд. физ.-мат. наук. Воронеж, 1975.

15. Милошенко В.Е. О природе внутреннего трения в области сверхпроводящего перехода // ФТТ. 1981. Т. 23, вып. 8. С. 2490-2491, и деп. ВИНТИ № 5495-82 Деп. 1982, 19 с.

16. Асламазов Л.Г., Ларкин А.И. Влияние флуктуаций на свойства сверхпроводника при температурах выше критической // ФТТ. 1968. Т. 10, вып. 4. С. 1104-1111.

17. Постников В.С., Милошенко В.Е., Давыдов Д.В., Пантелеев И.Н. О внутреннем трении многослойных пленок в области $4,2-100$ К // ФНТ. 1976. Т. 2, № 4. С. 533-536.

4. Golev I.M., Milošenko V.E. Ustanovka dlâ izmereniâ vnutrennego treniâ metallov v tokovom sostoânii pri temperature $4,2 \pm 300$ K // Pribory i tehnika èksperimenta. 1988. № 5. S. 215-217.

5. Postnikov V.S., Safonov I.A., Zolotuhin I.V., Milošenko V.E. Ustanovka dlâ izmereniâ vnutrennego treniâ plenok v processe plastičeskoj deformacii v intervale temperatur $4,2 \pm 300$ K // Pribory i tehnika èksperimenta. 1977. № 5. S. 184-186.

6. Pustovalov V.V. Metody izučeniâ plastičnosti i pročnosti tverdyh tel pri nizkih temperaturah. Kiev: Naukova dumka, 1971.

7. Milošenko V.E., Gol'ter A.È. Nizkočastotnoe ustrojstvo dlâ izmereniâ vnutrennego treniâ v tonkih metalličeskih plastinah. V kn.: 21^e sovešanie po fizike nizkih temperatur, č. IV. Har'kov, 1980. S. 319-320.

8. Postnikov V.S., Zolotuhin I.V., Milošenko V.E. Vliânie sverhprovodâšego perehoda na vnutrennee trenie tantala // Pis'ma v ŽÈTF. 1971. T. 13. S. 10-13.

9. Milošenko V.E., Šuhalov E.I. Vliânie struktury na vnutrennee trenie tantala pri N-S perehode // FNT. 1976. T. 2, № 10. S. 1480-1482.

10. Postnikov V.S., Zolotuhin I.V., Milošenko V.E. Vnutrennee trenie i otnositel'nyj modul' uprugosti niobiâ v normal'nom i sverhprovodâšem sostoânii // FTT. 1972. T. 14. S. 940-942.

11. Savickij E.M., Postnikov V.S., Zolotuhin I.V., Milošenko V.E., Baron V.V., Byčkova M.I. Vliânie sverhprovodâšego perehoda na vnutrennee trenie i otnositel'nyj modul' uprugosti splavov sistemy niobij-titan. V kn.: Splavy redkih metallov s osobymi fizičeskimi svojstvami. M.: Nauka, 1974. S. 31-35.

12. Postnikov V.S., Zolotukhin I.V., Miloshenko V.E., Shunin G.E. On mechanism of attenuation sound oscillations in films at superconduction transition. In book: Internal friction and ultrasonics attenuation in crystalline solids. Vol. I. Berlin-Yew-York, 1975. P. 137-150.

13. Nacik V.D. O nizkočastotnom vnutrennem trenii v sverhprovodnikah // FTT. 1974. T. 16, vyp. 2. S. 526-531.

14. Šunin G.E. Mehanizmy vnutrennego treniâ metallov v oblasti sverhprovodâšego perehoda. Dis. kand. fiz.-mat. nauk. Voronež, 1975.

15. Milošenko V.E. O prirode vnutrennego treniâ v oblasti sverhprovodâšego perehoda // FTT. 1981. T. 23, vyp. 8. S. 2490-2491, i dep. VINITI № 5495-82 Dep. 1982, 19 s.

16. Aslamazov L.G., Larkin A.I. Vliânie fluktuacij na svojstva sverhprovodnika pri temperaturah vyše kritičeskoj // FTT. 1968. T. 10, vyp. 4. S. 1104-1111.

17. Postnikov V.S., Milošenko V.E., Davydov D.V., Pantelev I.N. O vnutrennem trenii mnogoslojnyh plenok v oblasti $4,2-100$ K // FNT. 1976. T. 2, № 4. S. 533-536.



18. А. с. СССР № 616856 от 23.03.1973 г. Способ определения адгезии тонких фольг к подложке / Милошенко В.Е., Золотухин И.В., Постников В.С.

19. Милошенко В.Е., Голев И.М., Дорофеев П.Г. Внутреннее трение как метод контроля // Контроль. Диагностика. 2002. № 10. С. 16-18.

20. Милошенко В.Е., Голев И.М. Физические процессы в упругих элементах криогенных акселерометров // Известия РАН, серия физическая. 1995. Т. 59, № 10. С. 39-44.

21. Милошенко В.Е., Постников В.С., Шунин Г.Е. Особенности внутреннего трения сверхпроводников в магнитном поле // ФТТ. 1974. Т. 16. С. 957-959.

22. Милошенко В.Е., Савельев Ю.Н. О влиянии ориентации сверхпроводящей пластины на ее поведение в магнитном поле // Техническая электродинамика. 1980. № 4, С. 15-19.

23. Золотухин И.В., Милошенко В.Е., Рошупкин А.М., Сафонов И.А., Шунин Г.Е. Изгибные колебания тонких пластин в продольном магнитном поле // ФНТ. 1980. Т. 6. С. 230-235.

24. Милошенко В.Е., Воронин Б.В. Проникновение магнитного поля в сверхпроводники второго рода // ФТТ. 1985. Т. 27, вып. 12. С. 3701-3703 и Милошенко В.Е. Проникновение магнитного поля в монокристаллы ниобия. В кн.: Высокочистые и монокристаллические, металлические материалы. М.: Наука, 1987. С. 140-141.

25. Шушлебин И.М., Милошенко В.Е. Барьер в поверхностном слое сверхпроводника Y-Ba-Cu-O // СФХТ. 1989. Т. 2, № 12. С. 79-83.

26. Милошенко В.Е., Шушлебин И.М., Калядин О.В., Авдеев М.А. О некоторых процессах при проникновении магнитного поля в текстурированные иттриевые ВТСП // Конденсированные среды и межфазные границы. 2011. Т. 13, № 4. С. 467-470.

27. Милошенко В.Е., Калядин О.В. О разделении вкладов упругорелаксационных и магнитоупругих эффектов в сверхпроводниках // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 5. С. 12-19.

28. Милошенко В.Е., Калядин О.В., Измайлов Ю.В. Влияние магнитного поля на свободно движущиеся сверхпроводники в звуковом диапазоне частот // ЖТФ. 2009. Т. 79, вып. 4. С. 97-103.

29. Милошенко В.Е., Золотухин И.В., Шунин Г.Е., Сафонов И.А., Пантелеев И.Н., Савельев Ю.Н. Поведение колеблющихся сверхпроводящих пластин в магнитном поле. В кн.: Материалы АН СССР 20^{го} Всесоюзного совещания по физике низких температур (НТ-20) ч. III. Черноголовка, 1978. С. 149-150.

30. Милошенко В.Е., Савельев Ю.Н. Крутильные колебания сверхпроводящих пластин в магнитном поле // Техническая электродинамика. 1983. № 1. С. 21-23.

31. Милошенко В.Е., Кармазин В.М. Исследование охлаждаемых электромагнитных опор // Техническая электродинамика. 1986. № 2. С. 31-34.

18. А. с. СССР № 616856 от 23.03.1973 г. Способ определения адгезии тонких фольг к подложке / Милошенко В.Е., Золотухин И.В., Постников В.С.

19. Милошенко В.Е., Голев И.М., Дорофеев П.Г. Внутреннее трение как метод контроля // Контроль. Диагностика. 2002. № 10. С. 16-18.

20. Милошенко В.Е., Голев И.М. Физические процессы в упругих элементах криогенных акселерометров // Известия РАН, серия физическая. 1995. Т. 59, № 10. С. 39-44.

21. Милошенко В.Е., Постников В.С., Шунин Г.Е. Особенности внутреннего трения сверхпроводников в магнитном поле // ФТТ. 1974. Т. 16. С. 957-959.

22. Милошенко В.Е., Савельев Ю.Н. О влиянии ориентации сверхпроводящей пластины на ее поведение в магнитном поле // Техническая электродинамика. 1980. № 4, С. 15-19.

23. Золотухин И.В., Милошенко В.Е., Рошупкин А.М., Сафонов И.А., Шунин Г.Е. Изгибные колебания тонких пластин в продольном магнитном поле // ФНТ. 1980. Т. 6. С. 230-235.

24. Милошенко В.Е., Воронин Б.В. Проникновение магнитного поля в сверхпроводники второго рода // ФТТ. 1985. Т. 27, вып. 12. С. 3701-3703 и Милошенко В.Е. Проникновение магнитного поля в монокристаллы ниобия. В кн.: Высокочистые и монокристаллические, металлические материалы. М.: Наука, 1987. С. 140-141.

25. Шушлебин И.М., Милошенко В.Е. Барьер в поверхностном слое сверхпроводника Y-Ba-Cu-O // СФХТ. 1989. Т. 2, № 12. С. 79-83.

26. Милошенко В.Е., Шушлебин И.М., Калâдин О.В., Авдеев М.А. О некоторых процессах при проникновении магнитного поля в текстурированные иттриевые ВТСП // Конденсированные среды и межфазные границы. 2011. Т. 13, № 4. С. 467-470.

27. Милошенко В.Е., Калâдин О.В. О разделении вкладов упругорелаксационных и магнитоупругих эффектов в сверхпроводниках // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 5. С. 12-19.

28. Милошенко В.Е., Калâдин О.В., Измайлов Ю.В. Влияние магнитного поля на свободно движущиеся сверхпроводники в звуковом диапазоне частот // ЖТФ. 2009. Т. 79, вып. 4. С. 97-103.

29. Милошенко В.Е., Золотухин И.В., Шунин Г.Е., Сафонов И.А., Пантелеев И.Н., Савельев Ю.Н. Поведение колеблющихся сверхпроводящих пластин в магнитном поле. В кн.: Материалы АН СССР 20^{го} Всесоюзного совещания по физике низких температур (НТ-20) ч. III. Черноголовка, 1978. С. 149-150.

30. Милошенко В.Е., Савельев Ю.Н. Крутильные колебания сверхпроводящих пластин в магнитном поле // Техническая электродинамика. 1983. № 1. С. 21-23.

31. Милошенко В.Е., Кармазин В.М. Исследование охлаждаемых электромагнитных опор // Техническая электродинамика. 1986. № 2. С. 31-34.

32. Милошенко В.Е., Кармазин В.М. Вращающиеся сверхпроводящие опоры // Техническая электродинамика. 1989. № 6. С. 10-14.



32. Милошенко В.Е., Кармазин В.М. Вращающиеся сверхпроводящие опоры // Техническая электродинамика. 1989. № 6. С. 10-14.

33. Милошенко В.Е., Ломакин В.В., Савельев Ю.Н., Рошупкин А.М., Шунин Г.Е. Крутильные колебания сверхпроводящих пластин в магнитном поле // ФНТ. 1980. Т. 6, № 6. С. 2980-2981; Деп. Харьков ФТИНТ 1980, 26 с, № 2443-80 деп. от 8.06.80.

34. Gittleman J.I., Rosenblum B. Radi-frequency resistance in the mixed stat for subcritical currents // Phys Red. Lett. 1966. V. 16. P. 734-736.

35. Милошенко В.Е., Пантелеев И.Н., Шунин Г.Е. Исследование сверхпроводников, находящихся в переменных полях малой амплитуды // Техническая электродинамика. 1988. № 2. С. 7-11.

36. Пантелеев И.Н. Исследование динамических характеристик сверхпроводников в магнитном поле методом изгибных и крутильных колебаний. Дис. канд. физ.-мат. наук. Воронеж, 1984.

37. А. с. СССР №1100124 от 23.09.80. Способ измерения критических магнитных полей в сверхпроводниках. / Милошенко В.Е., Пантелеев И.Н. // опубл. 23.02.83, бюл. №8.

38. Милошенко В.Е., Ефимов Ю.В., Бровко А.П., Голев И.М., Шамрай В.Ф., Савельева М.Е. Магнитоупругие эффекты тонких фольг чистого ниобия // ФММ. 1989. Т. 6, № 6. С. 1216-1219.

39. Милошенко В.Е., Шунин Г.Е., Ломакин В.В. Механизмы внутреннего трения в сверхпроводниках в магнитном поле. Воронеж: ВПИ, 1977. Деп. в ВИНТИ № 1542-77, Деп. 64 с.

40. Милошенко В.Е., Шушлебин И.М., Голев И.М. Сверхпроводники в магнитных полях малой амплитуды // Техническая электродинамика. 1988. № 2. С. 7-11.

33. Milošenko V.E., Lomakin V.V., Savel'ev Ū.N., Rošupkin A.M., Šunin G.E. Krut'il'nye kolebaniâ sverhprovodâših plastin v magnitnom pole // FNT. 1980. T. 6, № 6. S. 2980-2981; Dep. Har'kov FTINT 1980, 26 s, № 2443-80 dep. ot 8.06.80.

34. Gittleman J.I., Rosenblum B. Radi-frequency resistance in the mixed stat for subcritical currents // Phys Red. Lett. 1966. V. 16. P. 734-736.

35. Milošenko V.E., Panteleev I.N., Šunin G.E. Issledovanie sverhprovodnikov, nahodâšihsâ v pere-mennyh polâh maloj amplitudy // Tehničeskaâ elektrodinamika. 1988. № 2. S. 7-11.

36. Panteleev I.N. Issledovanie dinamičeskih harakteristik sverhprovodnikov v magnitnom pole metodom izgibnyh i krut'il'nyh kolebanij. Dis. kand. fiz.-mat. nauk. Voronež, 1984.

37. А. с. СССР №1100124 от 23.09.80. Способ измерения критических магнитных полей в сверхпроводниках. / Milošenko V.E., Panteleev I.N. // opubl. 23.02.83, бюл. №8.

38. Milošenko V.E., Efimov Ū.V., Brovko A.P., Golev I.M., Šamraj V.F., Savel'eva M.E. Magnitoupругie êffekty tonkih fol'g čistogo niobiâ // FMM. 1989. T. 6, № 6. S. 1216-1219.

39. Milošenko V.E., Šunin G.E., Lomakin V.V. Mehanizmy vnutrennego treniâ v sverhprovodnikah v magnitnom pole. Voronež: VPI, 1977. Dep. v VINITI № 1542-77, Dep. 64 s.

40. Milošenko V.E., Šušlebin I.M., Golev I.M. Sverhprovodniki v magnitnyh polâh maloj amplitudy // Tehničeskaâ elektrodinamika. 1988. № 2. S. 7-11.

Транслитерация по ISO 9:1995

