

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г. И. Будкера СО РАН
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН
(ИЯФ СО РАН)

И. Ю. Басок

МЕХАНИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ПРОВОЛОЧНОЙ
СТРУКТУРЫ ДРЕЙФОВОЙ КАМЕРЫ
ДЕТЕКТОРА КЕДР

ИЯФ 2013-16

НОВОСИБИРСК
2013

**Механическая стабильность проволочной
структуры дрейфовой камеры
детектора КЕДР**

И. Ю. Басок

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

В работе обсуждаются вопросы механической стабильности проволочной структуры, связанные с применением других материалов при изготовлении новой дрейфовой камеры. Исследованы механические свойства катодной алюминиевой проволоки, измерена величина спада натяжения проволочек вследствие ползучести материала; подробно изучена тема надёжности крепления проволочек.

**Mechanical stability of wire structure
of the KEDR drift chamber**

I. Yu. Basok

Budker Institute of Nuclear Physics,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract

In the work the issues concerning mechanical stability of the wire structure and associated with the use of different materials in the making of a new drift chamber are discussed. The mechanical properties of aluminum cathode wire are investigated. The value of decline in wire tension as a result of material creep is measured. Topic of fixing security of wires is studied in detail.

© *Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН*

Содержание

Введение	5
1. Дрейфовая камера: конструкция, проволочная структура	6
2. Проволока CFW \varnothing 150 мкм Al/Ni/Au	9
2.1. Описание проволоки	9
2.2. Основные параметры проволоки	10
2.3. Методика измерений	11
2.4. Коэффициент упругости, неупругие деформации	12
2.5. Коэффициент теплового расширения	12
2.6. Накопление неупругих деформаций при статической рабочей нагрузке	14
3. Релаксация материала проволочек в дрейфовой камере	16
3.1. Методика исследования	16
3.2. Результаты измерений	17
4. Подбор степени обжима пина	22
5. Механическая стабильность проволочек в дрейфовой камере	24
5.1. Натяжение проволочек: баланс сил	26
5.2. Движение пина из отверстия под нагрузкой	27
5.3. Усилие снятия разъёма с пина	31
5.4. Выводы	31
Заключение	33
Список литературы	35

Введение

В ИЯФ СО РАН в настоящее время ведутся эксперименты по физике высоких энергий с универсальным магнитным детектором КЕДР [1] на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-4М. В качестве координатной системы детектора используется дрейфовая камера (ДК) — газовый многослойный проволочный детектор, работающий в пропорциональном режиме. Назначение ДК — восстановление траекторий заряженных частиц, измерение импульсов и ионизационных потерь частиц с целью их идентификации. Для этого требуется высокое импульсное разрешение, которое определяется пространственным разрешением и радиационной длиной вещества детектора (проволочки и газ).

Благодаря использованию в ДК «холодного» газа ДМЭ, имеющего рекордно низкий коэффициент диффузии электронов ионизации, достигнуто пространственное разрешение 100 мкм. Недостатком же «холодного» газа является то, что скорость дрейфа в нём носителей заряда линейно зависит от напряжённости электрического поля и плотности газа. Поэтому серьёзные требования предъявляются к стабильности рабочих условий в камере, в частности, требование минимизации искажений полей в дрейфовой ячейке. В этом состоит задача оптимизации проволочной структуры ДК и обеспечения её стабильности в процессе работы. Высокое пространственное разрешение получено во многом благодаря успешному решению этих вопросов.

Существующая ДК создана около 20 лет назад и требует замены. Поэтому сегодня создаётся новая дрейфовая камера, проектное пространственное разрешение которой лучше 100 мкм. Помимо конструктивных усовершенствований, в ДК будут использованы новые камерная электроника и рабочий газ, применена методика измерения координаты вдоль проволочки по делению заряда. Тем не менее, основной целью является повышение надёжности работы камеры, в том числе, проволочной структуры.

Проволочки крепятся на торцах камеры с помощью так называемых пинов, посредством которых осуществляется либо подача высоковольтного потенциала на проволочку, либо съём с неё сигнала. Надёжность

этой механической системы — сведение к минимуму вероятности обрывов, провисаний проволочек, сохранение их натяжения в допустимых пределах по электростатическому и гравитационному смещениям в течение всего срока эксплуатации. С использованием других материалов (пины, проволока) возникла необходимость заново изучить вопросы механической стабильности проволочной структуры.

1. Дрейфовая камера: конструкция, проволочная структура

Дрейфовая камера имеет цилиндрическую форму и занимает пространство, ограниченное двумя цилиндрическими обечайками длиной 1100 мм и двумя торцевыми пластинами (рис. 1). Внутренняя обечайка диаметром 250 мм выполнена из углепластика толщиной 1.5 мм. Внешняя обечайка толщиной 5 мм изготовлена из стеклотекстолита и имеет диаметр 1070 мм. Проволочки натянуты между двумя торцевыми пластинами из стеклотекстолита толщиной 20 мм. Длина проволочек равна 970 мм.

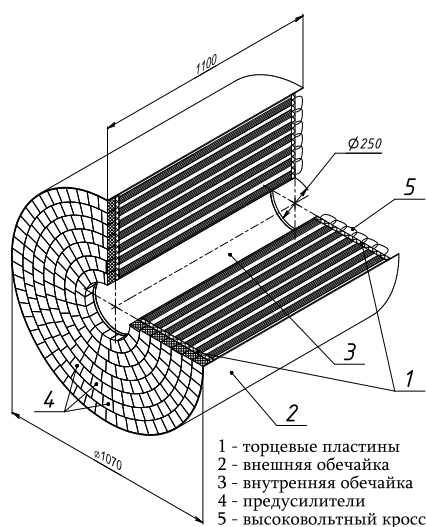


Рис. 1. Общий вид дрейфовой камеры

Камера содержит около 16 тыс. проволочек, в том числе 1512 сигнальных, объединенных в 252 рабочие ячейки. Ячейки образуют семь концен-

трических цилиндрических суперслоёв (рис. 2), из которых три чётные — стереосуперслои с проволочками, наклоненными под углом ± 100 мрад к оси камеры.

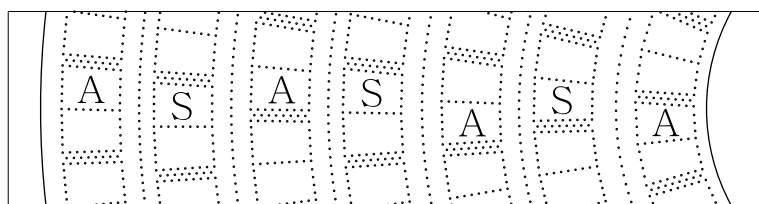


Рис. 2. Проволочная структура: А – аксиальный суперслой, S – стереосуперслой

Ячейка (рис. 3) включает восемь анодных проволочек, шесть из которых — чувствительные (сигнальные). Крайние — нерабочие анодные проволочки — служат для выравнивания полей в ячейке. Радиальное расстояние между анодными проволочками равно 4.5 мм. Чувствительные анодные проволочки изготовлены из позолоченного вольфрама диаметром 28 мкм и имеют натяжение 100 г.

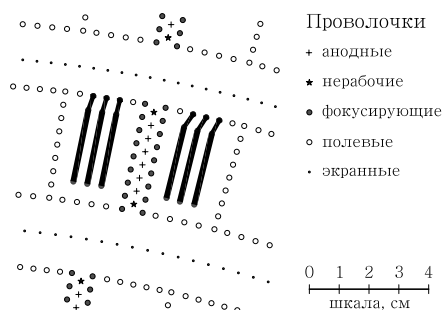


Рис. 3. Ячейка дрейфовой камеры

Справа и слева от плоскости с анодными проволочками на расстоянии ± 3.5 мм расположены два ряда фокусирующих проволочек, значение потенциала на которых определяет коэффициент газового усиления на анодных проволочках. Распределение потенциалов на полевых проволочках создает однородное поле в дрейфовом промежутке. Внутри ячейки на поверхности торцевых пластин ДК нанесены металлические полоски для уменьшения искажения полей из-за краевого эффекта. Полевые про-

лочки расположены с шагом около 4.5 мм. Для фокусирующих, полевых и нерабочих анодных проволочек используется золочёная титановая проволока диаметром 150 мкм; натяжение их составляет 250 г. Радиальный размер ячейки равен 36 мм, максимальное расстояние дрейфа — около 30 мм.

Между суперслоями натянуты дополнительные слои экранных проволочек. Находясь под оптимальным потенциалом, они позволяют уменьшить взаимное влияние соседних суперслоёв на однородность электрического поля в ячейке и сократить расстояние между ними до 21 мм. В качестве экранных проволочек используется золочёная титановая проволока диаметром 70 мкм.

В торцевых пластинах просверлены отверстия, проволочки в которых крепятся методом обжима в нержавеющей пинах наружным диаметром 1 мм. Диаметр внутреннего отверстия в пинах для крепления анодных проволочек равен 60 мкм, для полевых — 200 мкм. Съём сигналов и подача высоковольтного потенциала осуществляется через гнездовые соединения от разъёмов ГРПМ1. Соответственно, на одном торце камеры расположены предусилители, на другом — кросс с высоковольтными делителями (см. рис. 1).

В новой ДК используются другие материалы (пины, проволока, стеклотекстолит), и это переопределяет механические параметры проволочной структуры. В связи с этим потребовалось заново изучить ряд вопросов.

1. Используемая для натяжения существующей ДК титановая проволока диаметром 150 мкм в настоящее время не производится. В работе [2] проведено исследование качества поверхности различных образцов проволоки и выбрана новая проволока того же диаметра из алюминиевого сплава, гальванизированная золотом. Необходимо изучить её механические свойства.
2. Для алюминия в большей степени, чем для других материалов, характерно явление ползучести. Это приводит к существенному уменьшению силы натяжения проволочек в камере за несколько лет. Для того чтобы учесть этот эффект ещё на стадии процедуры натяжения проволочек, требуется знание величины спада.
3. С целью понижения высокого напряжения на камере, но с сохранением прежней величины коэффициента газового усиления, а также для повышения чувствительности метода деления заряда выбрана анодная проволочка меньшего диаметра: вместо 28 используется

20 мкм. Кроме того, пины, существенная их часть, изготовлены из новых трубок, имеющих иные диаметры внутреннего канала. Для каждого типа проволоки должны быть подобраны толщины обжима пина, а надёжность этого обжима проконтролирована в испытаниях с натяжением проволоки выше рабочего. По аналогии следует рассмотреть обжим новой проволоки в старой трубке.

4. Анодные пины фиксируются в отверстиях втулками для предохранения проволоки от повреждения. В случае экранированных проволочек такого крепления не предусмотрено. Становится задача выяснить, какова вероятность нарушить целостность тонких экранированных проволочек без дополнительной фиксации пинов.

Данная работа посвящена исследованию перечисленных вопросов.

2. Проволока CFW \varnothing 150 мкм Al/Ni/Au

2.1. Описание проволоки

В новой дрейфовой камере (ДК) детектора КЕДР в качестве катодных (полевых) проволочек применена проволока компании CFW¹⁾.

Основной материал проволоки — алюминиевый сплав марки 5056. Для минимизации эффекта рассеяния на проволочках, когда происходит отклонение траектории регистрируемой элементарной частицы, необходим материал с низким атомным весом. Чистый бериллий был бы идеальным решением при условии его доступности, но алюминий представляется наиболее лёгким из широко используемых на практике металлом. Кроме того, радиационная длина алюминия в 2.5 раза больше, чем у титана, из которого изготовлены катодные проволочки старой ДК. Это приводит к понижению вклада многократного рассеяния на проволочках в импульсное разрешение более чем в 1.5 раза.

Проволока имеет диаметр 150 мкм и покрыта слоем золота толщиной 0.5...0.9 мкм (рис. 4), при этом его доля в общей массе составляет в среднем 12% ввиду более чем в 7 раз превосходящей плотности. Золото нанесено гальваническим способом на два промежуточных покрытия: цинката (оксид с цинком) и никелевое, — первое из которых обеспечивает хорошее сцепление с алюминием, а второе — с золотом. Вся толщина промежуточных слоёв составляет не более 0.25 мкм. Золочение преследует три цели: во-первых, улучшить качество поверхности проволо-

¹⁾ California Fine Wire Co., Grover Beach, CA, USA.

ки и, следовательно, увеличить порог возникновения коронного разряда [2], во-вторых, обеспечить хороший электрический контакт в пине, в-третьих, избежать возможности поверхностных электрических пробоев вследствие накопления положительного заряда на плёнке оксида алюминия (Малтер-эффект [3]).

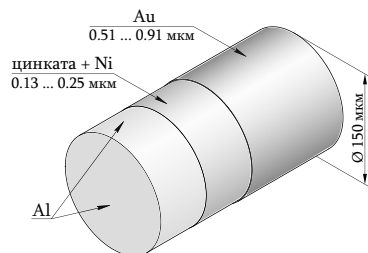


Рис. 4. Структура проволоки CFW $\varnothing 150$ мкм Al/Ni/Au (указана толщина покрытия)

2.2. Основные параметры проволоки

Механические свойства проволоки характеризуются несколькими параметрами:

1. Коэффициент упругости, определяемый из соотношения:

$$F = k \cdot \frac{\Delta l}{l}, \quad (1)$$

где k — коэффициент упругости, $\frac{\Delta l}{l}$ — относительное удлинение, F — сила натяжения. Поскольку в наших измерениях размерность силы суть грамм, $[F] = \text{г}$, то и $[k] = \text{г}$.

2. Предел упругости — максимальная величина силы натяжения, при которой ещё выполняется закон прямой пропорциональности (1).
3. Предел текучести — условная²⁾ величина нагрузки, при которой начинают интенсивно накапливаться пластические деформации. Критерием определения этого предела служит начало прогрессирующего роста необратимой деформации, когда удлинение проволоки после пятиминутной выдержки под соответствующей нагрузкой уже

²⁾ О пределе текучести говорят, часто не делая разницы с пределом упругости, но, как правило, эти величины отличаются примерно на 5–10%.

составляет по абсолютной величине несколько значений приборной погрешности микрометра, т. е. порядка 30 мкм.

4. Предел прочности — наибольшая нагрузка, предшествующая разрыву проволоки.
5. Отклонение от линейного закона, характеризуемое величиной:

$$\delta = \frac{(\Delta l/l)_{\text{изм}} - (\Delta l/l)_k}{(\Delta l/l)_k} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $(\Delta l/l)_{\text{изм}}$ — измеренное относительное удлинение, $(\Delta l/l)_k$ — относительное удлинение, вычисленное по линейному закону и экстраполированное на область неупругих деформаций.

2.3. Методика измерений

Проволока натягивалась вдоль балки из дюралюминия, на одном конце которой установлен металлический упор, на другом — ролик (рис. 5). Один конец проволоки обжат в трубке из нержавеющей стали и закреплён на упоре. На другом конце — со стороны ролика — с помощью крючка подвешивались грузы различной массы. В двух местах — вблизи обжима и на расстоянии 1 м — установлены микроскопы на подвижных каретках, снабжённых индикаторами часового типа с ценой деления 0.01 мм. Эти положения обозначены как узел А и узел В соответственно. В поле зрения каждого микроскопа на проволоку наносится метка. Удлинение проволоочки определяется по перемещению меток.

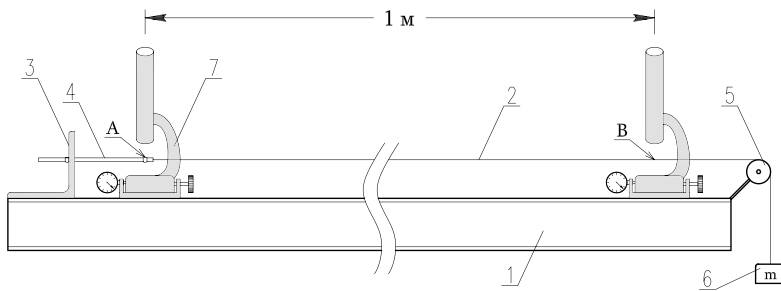


Рис. 5. Схема установки для механических испытаний проволоки. 1 — балка, 2 — проволока, 3 — упор, 4 — трубка пина, 5 — ролик, 6 — груз, 7 — микроскоп на подвижной каретке с микрометром

2.4. Коэффициент упругости, неупругие деформации

Были проведены 5 серий измерений, в каждой из которых проволока последовательно нагружалась с шагом 50 г до момента обрыва. Для того чтобы выбрать все изгибы проволоки, до процедуры измерений создавалось предварительное натяжение в 50 г, при котором удлинение принималось нулевым. Пример того, как удлиняется проволока при систематическом наращивании нагрузки, изображён на рис. 6. Здесь же приведена динамика накопления остаточной деформации, когда после выдержки проволоки под нагрузкой наблюдалось её релаксированное состояние при исходном натяжении 50 г.

В расчёте коэффициента упругости линейная аппроксимация данных проведена в диапазоне 50...450 г для каждой серии измерений. Задавшись доверительной вероятностью $\alpha = 0.95^3$, упругость характеризуется параметром:

$$k = (124.4 \pm 2.4) \cdot 10^3 \text{ г},$$
$$\Delta k / \bar{k} = 0.019 = 1.9\%$$

(доверительная вероятность 0.95).

Здесь также указана относительная погрешность измерения. Таким образом, если взять образец проволоки длиной 1 м, то каждые в среднем 124.4 г нагрузки вызывают удлинение на 1 мм.

Пределы упругости и текучести хорошо видны на картине отклонений от линейного закона (см. рис. 6). Первый из них можно определить как верхнюю границу области околонулевых отклонений, до явной тенденции к росту величины δ (см. выражение (2)). Начало же её положительной, притом растущей, производной есть начало области текучести.

Разрыв проволоки происходит в среднем при 800 г. Место разрыва находилось, в основном, не в узлах крепления проволоки, а на её длине. В одном из измерений удалось дать оценку для нижнего предела скорости, с которой течёт материал проволоки на пределе прочности: $v_{\text{неупр}} \gtrsim 70 \text{ мкм/мин.}$

2.5. Коэффициент теплового расширения

Продолжительные по времени исследования свойств проволоки с регулярным снятием показаний требуют учёта температурной зависимости линейного размера как самого образца, так и элементов измерительной

³⁾ При этом для числа измерений $n = 5$ коэффициент Стьюдента $t_{\alpha n} = 2.8$.

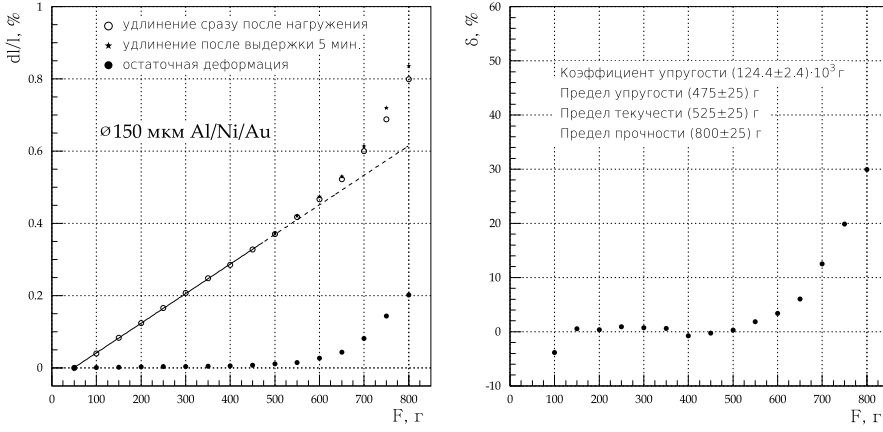


Рис. 6. Механические свойства проволоки CFW Al/Ni/Au диаметром 150 мкм: зависимость относительного удлинения от нагрузки (*слева*) и его отклонение от линейного закона (*справа*)

установки. Как известно, коэффициент линейного теплового расширения (КТР) показывает относительное изменение длины l образца при изменении температуры T на $1\text{ }^\circ\text{C}$:

$$\alpha_l = \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{1}{\Delta T}. \quad (3)$$

Типичные значения КТР конструкционных материалов находятся в диапазоне $(10 \dots 30) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Это означает, что колебания температуры на несколько градусов будут приводить к изменениям 1 м длины образца на порядка 100 мкм.

В установке на рис. 5 двутавровая балка из сплава Д16Т и проволока из алюминиевого сплава марки 5056 имеют очень близкие значения КТР: $\alpha_l(\text{Д16Т}) = 23.8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_l(\text{Al5056}) = 24.1 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Поскольку в задачу входит лишь разность КТР материалов, то при условии их теплового равновесия с лабораторной средой на данной установке не должна наблюдаться температурная зависимость. Это подтверждается опытом, результаты которого изображены на рис. 7а. В этом измерении к проволоке подвешивался груз 50 г и в разное время суток в течение нескольких дней проводился набор статистики. В результате температурных эффектов не обнаружено с точностью $4 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. С целью оценки величины КТР материала проволоки проведён опыт в условиях ограниченного пространства (не более 10 м^3) и наличия конвективного теплопритока от ра-

диатора. Поскольку проволока тонкая, то нагревается она, по сравнению с массивной балкой, много быстрее. Следовательно, начальная производная кривой на рис. 7б больше описывает именно поведение проволоки. Со временем, по мере нагревания, сказывается влияние балки, и ход кривой загибается книзу. Поскольку повышение температуры в системе происходило неравномерно, а также в связи с несколько заниженными показаниями термометра из-за высокой динамики изменения температуры, определение КТР проволоки по первой производной на начальном участке кривой аппроксимации было бы неверным. Поэтому ограничимся лишь оценкой: из опыта видно, что на установке измерено максимальное удлинение порядка 100 мкм, при этом температура в системе возросла на 4 °С; отсюда $\alpha_l(\text{пров.}) \approx 25 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Эта величина находится в прекрасном согласии со справочными данными.

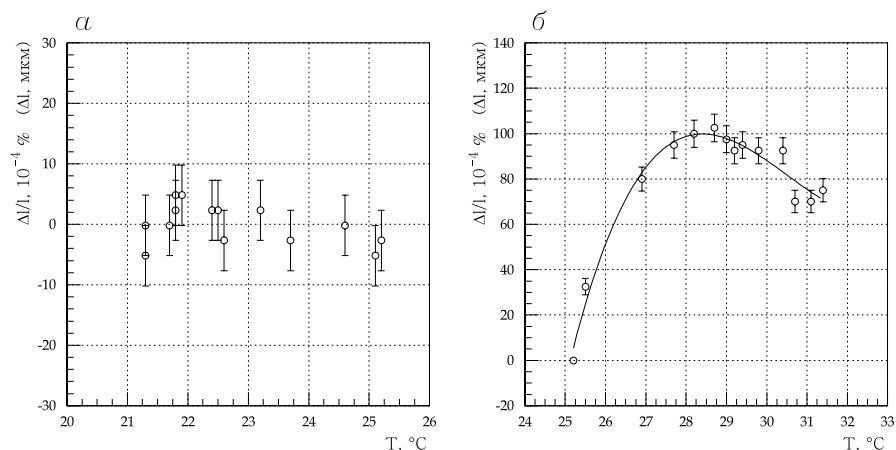


Рис. 7. Температурная зависимость относительного удлинения проволоки в системе с измерительной установкой: *a* – в условиях теплового равновесия со средой, *б* – при наличии положительного температурного градиента в направлении среды

2.6. Накопление неупругих деформаций при статической рабочей нагрузке

Поведение металлической проволоки, находящейся под нагрузкой из области её упругой деформации, на самом деле, представляет собой сумму двух эффектов: во-первых, это деформация, обусловленная упругими

свойствами металла, во-вторых, это деформация во времени, или текучесть, которая определяется величиной натяжения, температурой, физическими и химическими свойствами металла. Второй эффект связан с так называемой ползучестью металла, которая представляет собой процесс медленной и непрерывной пластической деформации под воздействием нагрузки. Алюминиевые сплавы в большей степени, чем другие материалы, имеют тенденцию к ползучести. Это приводит к тому, что в дрейфовой камере натяжение катодных проволочек из такого материала со временем ослабевает, и вместе с этим появляется неустойчивость проволочек, находящихся под электрическим потенциалом в поле, создаваемом другими проволочками [4].

Согласно физической модели, явление ползучести обусловлено движением дислокаций (дефектов в кристалле). Со временем число дислокаций уменьшается, поэтому скорость накопления неупругих деформаций падает и становится постоянной, при этом говорят, что процесс ползучести переходит в установившуюся стадию. Динамику неустановившейся ползучести обычно описывают логарифмическими или экспоненциальными функциями.

Различают два случая ползучести: последствие — явление роста деформаций при постоянной нагрузке; релаксация — уменьшение напряжений при постоянной деформации. В дрейфовой камере имеют место релаксационные процессы, и характер и величина уменьшения натяжения проволочек подробно изучены в п. 3. В данном же исследовании, с целью предварительной оценки ползучести, было измерено удлинение проволоки вследствие последствия за относительно короткий промежуток времени⁴⁾. Измерения проведены на установке, схема которой изображена на рис. 5. Вес груза составлял 250 г, период измерений — 10 суток (рис. 8). Исходя из предыдущих исследований, корреляции с температурой в измерениях нет, поэтому этот эффект не учитывался в обработке данных. Экспериментальные данные аппроксимировались функцией

$$f(x) = a \cdot (1 - e^{-\frac{x}{\tau}}), \quad (4)$$

где a — асимптота, или максимальное удлинение, предсказываемое в рамках краткосрочного периода, τ — характерное время, или время, за которое удлинение достигнет примерно 63% от максимального. По результатам обработки данных можно заключить, что на первой, сравнительно быстрой, стадии процесса временной текучести проволоки относительное

⁴⁾ Приблизительно на два порядка короче времени исследования на релаксацию (см. далее в пп. 3.2).

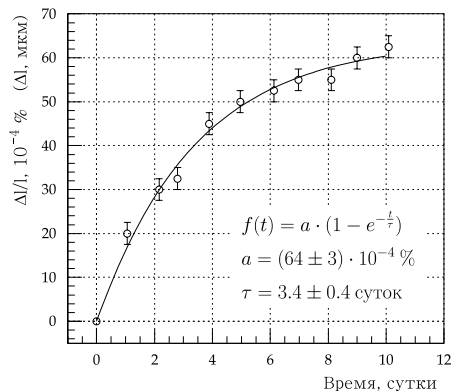


Рис. 8. Относительное удлинение проволоки со временем при статической нагрузке 250 г

удлинение составляет $6.4 \cdot 10^{-3} \%$, или 64 мкм на длине 1 м, при этом характерное время — 3.4 суток. Это соответствовало бы потере 8 граммов в натяжении проволоочки, что очень хорошо согласуется с результатами измерений релаксационного спада натяжения за тот же промежуток времени, которые обсуждаются далее.

3. Релаксация материала проволочек в дрейфовой камере

Эффект медленного уменьшения натяжения проволочек в дрейфовой камере тесно связан с ползучестью материала, из которого изготовлены проволочки (см. предыдущий пункт). Это так называемое явление релаксации сопровождается переходом части упругих деформаций в пластические [5], поэтому при неизменной начальной деформации происходит ослабление натяжения проволочек.

3.1. Методика исследования

Изучение релаксации проволочек и измерение величины эффекта проведены на стенде, схема которого изображена на рис. 9. В балке из стеклотекстолита с размерами $50 \times 60 \times 1100$ мм прорезана канавка, вдоль которой натягивались проволочки длиной 1 м и припаивались на обоих концах к пластинам с ламелями. Измерение натяжения проводилось с помощью блока контроля натяжения, выполненного в стандарте КАМАК.

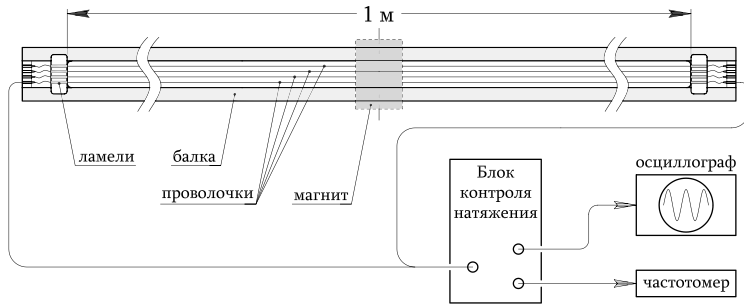


Рис. 9. Стенд для долговременных испытаний проволоки на текучесть

По центру проволоки установлен постоянный магнит для возбуждения колебаний первой гармоники. Частота колебаний наведённой ЭДС измерялась частотомером за время счёта 10 секунд, давая при этом точность 0.1 Гц.

Основная частота колебаний ν проволочки связана с силой её натяжения T по известному соотношению:

$$\nu = \frac{1}{2l} \cdot \sqrt{\frac{T}{\rho}}, \quad (5)$$

где l — длина проволоки, ρ — масса на единицу длины. Отсюда относительный спад величины натяжения запишется в виде:

$$-\frac{\Delta T}{T_0} = 1 - \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^2 \quad (6)$$

Здесь T_0 — начальное натяжение, соответствующее частоте ν_0 .

3.2. Результаты измерений

Были натянуты четыре проволочки: три алюминиевые — с усилиями 150, 250 и 350 г, одна титановая — с усилием 250 г. Титановая проволочка с таким же натяжением применялась в старой ДК, а в данном исследовании использовалась для сравнения. Измерение проводилось в течение трёх лет. По полученным данным соответствии с формулой (6) проведён расчёт величины релаксации проволочек. Из результатов, представленных на рис. 10, видно, что натяжение изменяется по экспоненциальному закону. Стало быть, вначале деформация ползучести быстро нарастает, затем процесс постепенно замедляется, и далее деформация асимптотически стремится к постоянной, равновесной величине. Такой в пределе

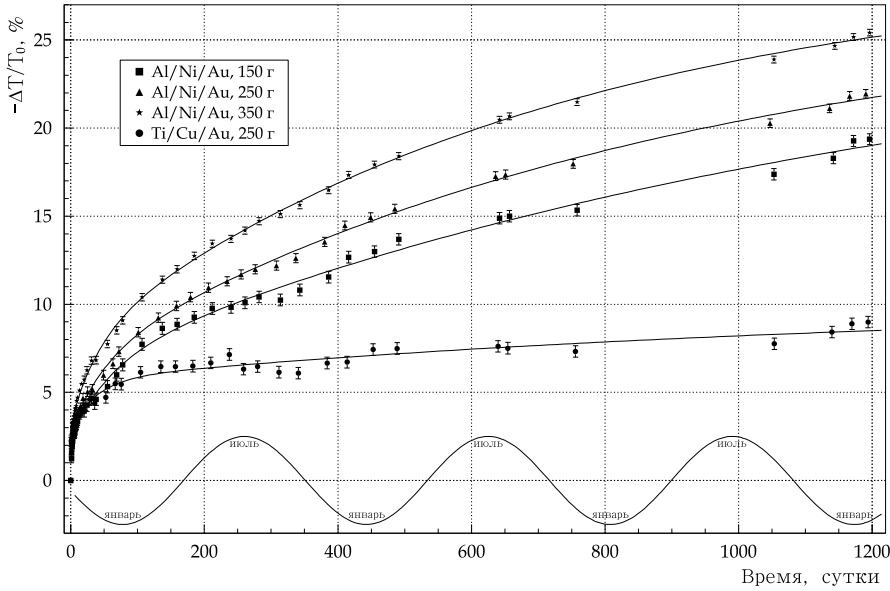


Рис. 10. Относительное изменение натяжения проволок в зависимости от времени

установившийся режим связан с неизменной полной деформацией (удлинением) проволок. Действительно, подобные процессы в простейшей модели К. Максвелла [5] описываются стандартной релаксационной формулой:

$$f(t) = p_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (7)$$

где p_0 — начальное значение параметра физической системы, по которому устанавливается равновесие, τ — время релаксации. Обычно релаксация является многоступенчатым процессом, т. к. не все физические параметры стремятся к равновесию с одинаковой скоростью. В нашем случае экспериментальные точки хорошо аппроксимируются суммой трёх экспонент, и в координатах на рис. 10 релаксационная формула принимает вид:

$$F(t) = \sum_{i=1}^3 a_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}), \quad (8)$$

где a_i — частичная величина падения натяжения в относительных единицах с характерным временем τ_i .

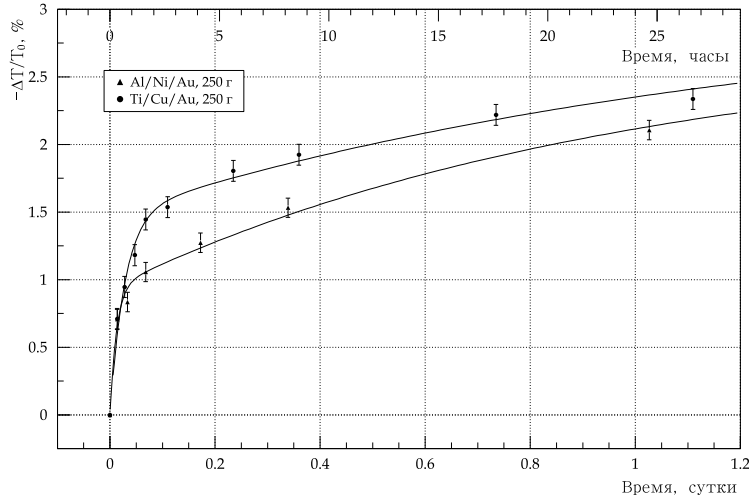


Рис. 11. Быстрая компонента падения натяжения проволочек в течение первых часов

Для обоих типов проволочек, натянутых с силой 250 г, удалось измерить быструю компоненту уменьшения натяжения, происшедшего в первые часы после натяжения (рис. 11), что, по нашему мнению, связано с расправлением проволоки после снятия с катушки. Из рисунка видно, что в течение первых двух часов натяжение падает примерно на 1% у алюминиевой проволоки и на 1.5% у титановой.

Температура и влажность оказывают существенное влияние на результаты измерений. Температура являлась контролируемым параметром и эффект от её изменения был скомпенсирован (рис. 12). КТР титановой и алюминиевой проволочек, закреплённых по краям балки из стеклотекстолита, имеют разные знаки и равны $-(4.9 \pm 0.5) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и $(8.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ соответственно. Очевидно, противоположный температурный эффект связан с тем, что значение КТР стеклотекстолита лежит между значениями КТР материалов проволочек⁵⁾.

После исключения температурной зависимости, тем не менее, разброс точек превышает ошибку, связанную с приборной погрешностью. Знаки отклонений точек (см. рис. 10) от теоретической кривой совпадают для

⁵⁾ КТР алюминиевой проволоки был определён в п. 2.5; отсюда, зная совместные температурные коэффициенты материалов проволочек и балки, несложно найти с точностью не хуже $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ КТР отдельных материалов: $\alpha_l(\text{Ti/Cu/Au}) = 11 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_l(\text{СТЭФ}) = 16 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_l(\text{Al/Ni/Au}) = 24 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

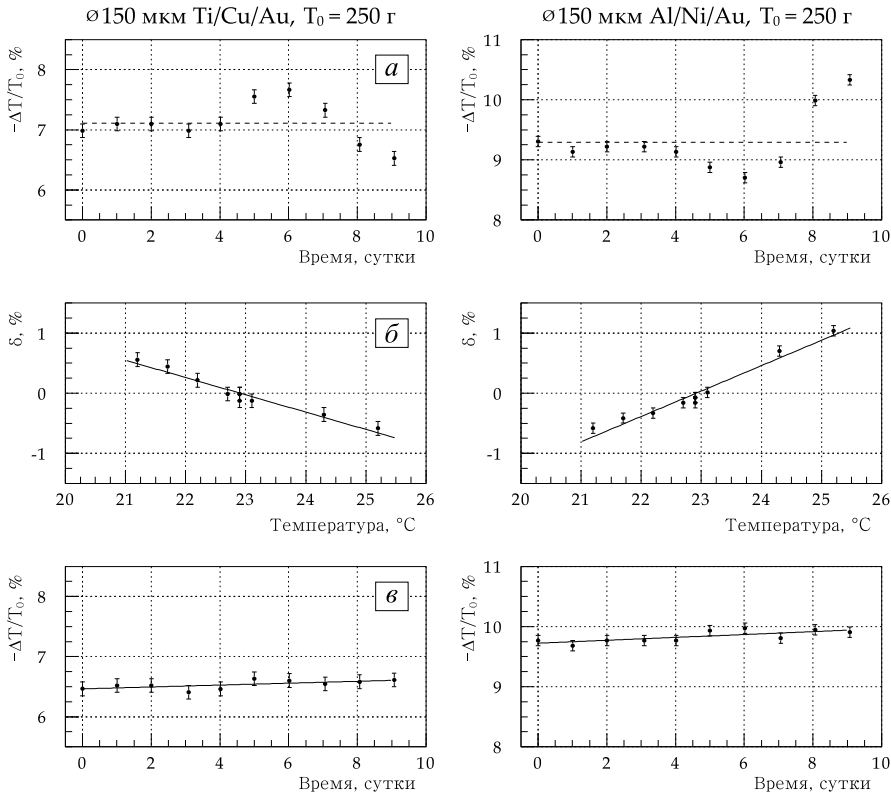


Рис. 12. Относительное изменение натяжения проволок: *a* – исходные данные; *б* – отклонение от среднего уровня натяжения в зависимости от температуры; *в* – после учёта температурной зависимости

всех проволок, поэтому можно предположить, что эта систематическая ошибка вызвана непостоянной длиной балки. Линейные размеры балки зависят от температуры и влажности воздуха, поскольку стеклотекстолит обладает — хотя и малой — гигроскопичностью. Известно, что в условиях низкой влажности происходит усушка материала и его размеры сокращаются, и наоборот. Такая тенденция отчётливо видна в зимний период и приводит к тому, что скорость спада натяжения становится выше средней (см. рис. 10). В связи с тем, что влажность воздуха не контролировалась, рассматриваемые систематические ошибки переведены в разряд случайных. В результате, для корректной аппроксимации, при ко-

Таблица 1. Параметры релаксационных кривых проволочек

параметр	Al/Ni/Au			Ti/Cu/Au
	150 г	250 г	350 г	250 г
a_1 , %	2.51 ± 0.14	2.82 ± 0.16	3.33 ± 0.15	2.91 ± 0.13
a_2 , %	4.0 ± 0.5	3.8 ± 0.4	4.4 ± 0.3	2.8 ± 0.2
a_3 , %	20 ± 3	20.4 ± 0.8	21.5 ± 0.4	4.3 ± 0.4
a_Σ , %	27 ± 3	27 ± 1	29.3 ± 0.5	10.0 ± 0.5
τ_1 , сутки	1.5 ± 0.2	1.1 ± 0.2	1.72 ± 0.15	0.62 ± 0.13
τ_2 , сутки	61 ± 14	51 ± 10	42 ± 6	38 ± 7
τ_3 , $\times 10^2$ суток	13 ± 4	8.9 ± 1.1	7.3 ± 0.5	12 ± 4

торой в критерии согласия Пирсона отношение $\chi^2/n_{df} \approx 1$, погрешности измерений увеличены приблизительно в 1.5 раза.

В случае титановой проволоки, из-за её большего коэффициента упругости, влияние влажности особенно велико. На фоне практически установившегося режима релаксации значительные сезонные колебания точек делают затруднительным поиск медленной экспоненты также и по причине того, что измерения проводились нерегулярно⁶⁾. Поэтому в данном исследовании сделана лишь оценка конечного падения натяжения проволочки, и процедура аппроксимации проводилась при условии ограничения сверху параметра времени релаксации в формуле (8). Поставив в качестве предела этого параметра весь период проведения измерений, конечное относительное уменьшение натяжения титановой проволоки не превысило 10%.

Параметры релаксационной формулы (8) по результатам аппроксимации для всех проволочек приведены в таблице 1. Здесь же указано значение полного падения натяжения, равное сумме частичных величин падения: $a_\Sigma = a_1 + a_2 + a_3$.

Можно заключить, что результирующее падение натяжения не зависит от первоначального натяжения алюминиевой проволоки в диапазоне 150...350 г и составляет не более 30%. По расчётам для старой дрейфовой камеры электростатических и гравитационных смещений проволочек в ячейке установлено, что натяжение полевых проволочек менее 175 г нежелательно. С учетом того, что при изготовлении старой ДК разброс

⁶⁾ Интервал между измерениями натяжения со временем увеличивался постольку, поскольку снижалась скорость релаксационных процессов. К тому же, это позволяет уменьшить нежелательный накапливающийся эффект от воздействия на состояние проволочки при её колебаниях во время измерений.

натяжений проволочек был порядка 5%, полная компенсация натяжения должна составлять 35%. Поэтому усилие, с которым необходимо натягивать алюминиевую проволочку, должно быть не менее

$$\frac{175 \text{ г}}{1 - 0.35} \approx 270 \text{ г.}$$

Поскольку в новой ДК сила натяжения анодных проволочек меньше, а также уменьшено число экранных проволочек, то при натяжении полевых проволочек с усилием 270 г нагрузка на торцевые пластины возрастёт по сравнению со старой ДК всего на 4% и составит 3.5 т.

4. Подбор степени обжима пина

Проволочки в дрейфовой камере фиксируются методом механического обжима в капилляре (пине) с внешним диаметром 1 мм, изготовленном из сплава 12Х18Н10Т. Для повышения пластичности проводят отжиг⁷⁾, при котором также понижается твёрдость металла и снимаются внутренние напряжения. Как отмечалось ранее, в ДК используются 3 типа проволочек: диаметрами 20, 70 и 150 мкм из вольфрам-ренийевого сплава, титана и алюминия соответственно. Различия диаметров и твёрдости материалов проволоки и пина требуют индивидуального подбора степени обжима.

Состояние проволоки в месте обжима её в пине контролировалось после его вскрытия. Вскрытый пин с проволокой исследовались на предмет, во-первых, наличия достаточной площади отпечатка, во-вторых, отсутствия чрезмерного заужения сечения проволоки в процессе обжима.

При изготовлении пинов использовались трубки четырёх видов: старые — с внутренними диаметрами 60 и 200 мкм соответственно для анодных и катодных проволочек, новые — с диаметрами 130 и 250 мкм. Для трёх типов проволоки были подобраны толщины обжима в новых трубках, а для алюминиевой — дополнительно и в старой трубке.

С целью проверки надёжности обжима проведены опыты на движение проволоки в обжатой трубке. Проволока нагружалась весом, большим величины рабочего натяжения, или близким к пределу её упругости, и выдерживалась в течение недели. Наличие движения или его отсутствие определялось по расстоянию между метками на пине и проволоке с помощью визира микроскопа (рис. 13). Это расстояние малó,

⁷⁾ Вакуумный отжиг при температуре 950 °С в течение 15 мин.

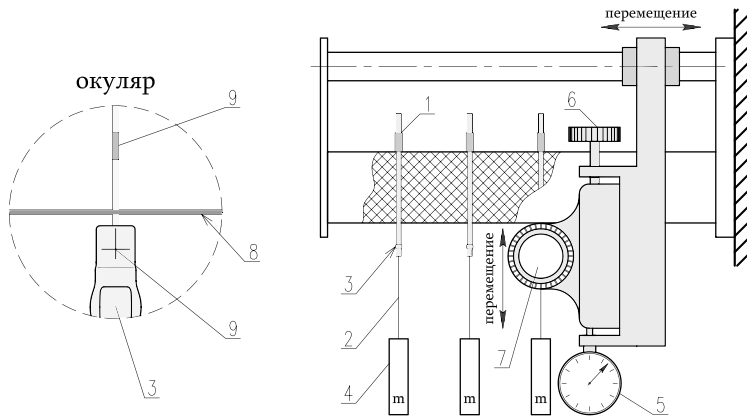


Рис. 13. Схема установки для опытов на движение проволоки в обжатой трубке. 1 – пин, 2 – проволока, 3 – место обжима, 4 – груз, 5 – микрометр, 6 – регулятор вертикального перемещения микроскопа, 7 – окуляр, 8 – визир, 9 – метка

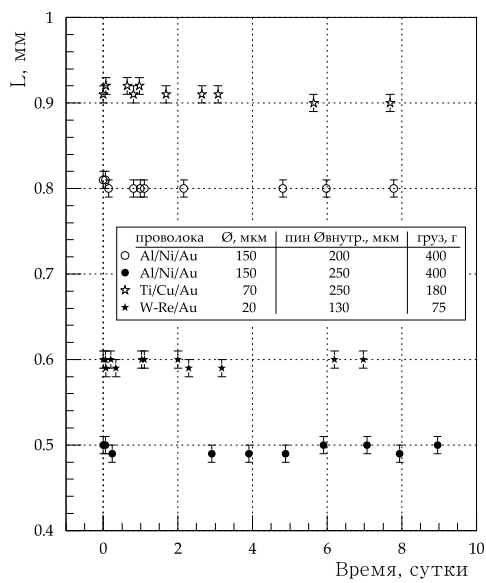


Рис. 14. Зависимость положения нагруженной проволоки в обжатом пине от времени

порядка 0.5...1 мм, поэтому удлинением из-за ползучести материала на таком участке проволоки можно пренебречь. Для того чтобы полученные результаты измерений имели статистическую значимость, в одном опыте устанавливались 3 одинаковых образца.

На рис. 14 приведены результаты измерений положения проволоки относительно пина для одного образца из каждого опыта. Ни в одном из опытов не обнаружилось сколько-нибудь заметное смещение метки на проволоке: величина расстояния колеблется в пределах погрешности измерений равной 10 мкм. Окончательные результаты подбора толщины обжима пинов оформлены в виде таблицы 2. Сюда же включены полученные ранее данные по обжиму проволочек диаметрами 20 и 70 мкм в старой трубке, а также указана толщина проволоки из вскрытого пина. Погрешность определения толщины обжима пина составляет 10 мкм, а толщина обжатого участка проволоки измерена с точностью не хуже 5 мкм. Результаты опытов и вскрытия трубок позволяют утверждать, что найденные толщины обжима пина гарантируют как отсутствие проскальзывания, так и критического заужения сечения проволоки в месте обжима. Вывод тем более справедлив при рабочих натяжениях проволоки.

Таблица 2. Толщины обжима пинов

пин		толщина обжима, мм		
трубка	диаметр внутр., мкм	W-Re/Au,	Ti/Cu/Au,	Al/Ni/Au,
		20 мкм	70 мкм	150 мкм
старая	60	0.68 [20] ⁸⁾	–	–
новая	130	0.69 [20]	–	–
старая	200	–	0.75 [55]	0.76 [110]
новая	250	–	0.68 [55]	0.78 [100]

5. Механическая стабильность проволочек в дрейфовой камере

Натяжение проволочек в ДК и сохранение силы натяжения является достаточно тонкой задачей в связи с механическими проблемами, возникающими в процессе эксплуатации и ремонта. Проволочка механически обжимается в трубке (пине), а на пин одевается гнездо от разъёма

⁸⁾ В квадратных скобках указана толщина деформированного участка проволоки в микронах.

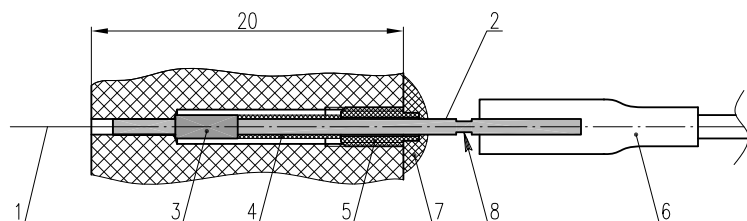


Рис. 15. Анодный пин в отверстии. 1 – проволочка, 2 – пин, 3 – «юбка» пина, 4 – трубка Ф-4 из фторопласта, 5 – втулка, 6 – разъем ГРПМ1, 7 – герметик, 8 – место обжима

ГРПМ1 для подачи высокого потенциала на проволочку или снятия с неё сигнала (рис. 15). Усилие, которое необходимо приложить при разъединении контакта, может привести к удлинению проволочки с пластическими деформациями и даже её разрыву. Поэтому самые тонкие проволочки – анодные диаметром 20 мкм – защищены втулками, препятствующими смещению пина при снятии разъёма (см. рис. 15). Фиксация пина происходит благодаря трубке из фторопласта, которая с одной стороны упирается в «юбку» пина, а с другой – во втулку.

Натянутые между соседними суперслоями экранные проволочки не имеют подобной защиты. Они изготовлены из покрытого медью титана с нанесением золотого покрытия, их диаметр составляет 70 мкм (рис. 16).

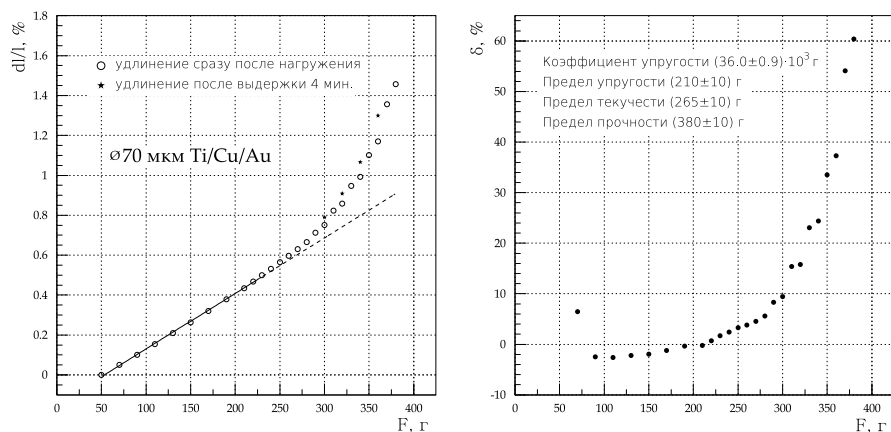


Рис. 16. Механические свойства проволоки диаметром 70 мкм из Ti/Cu/Au: зависимость относительного удлинения от нагрузки (слева) и его отклонение от линейного закона (справа)

В силу малого диаметра характеристики текучести и прочности невысоки: при механических напряжениях более 260 г начинает развиваться пластическая деформация, а разрывное усилие не превышает 380 г. В связи с этим возникает необходимость в оценке степени риска того, что состояние проволоки окажется недопустимым (критическое падение натяжения, провисание, разрыв).

5.1. Натяжение проволочек: баланс сил

В общем случае действующие в системе силы изображены на рис. 17. При условии отсутствия движения, т.е. до ситуации, при которой происходит разрыв проволоки, силы взаимоуравновешены и их результирующая равна нулю:

$$\vec{T} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{F} + \vec{F}_{\text{у.г.}} = 0, \quad (9)$$

где T — натяжение проволочки, N — реакция опоры, F — усилие снятия разъёма, $F_{\text{тр}}$ — трение покоя пина в отверстии, $F_{\text{у.г.}}$ — сила упругости герметика. Имея начальное натяжение проволочки T_0 , рассмотрим интервалы величины F :

1. $0 < F \leq T_0$, $F = T_0 - N$. В граничном случае ($F = T_0$) всю реакцию опоры, вызванную натяжением T_0 , берёт на себя сила F .
2. $T_0 < F \leq T_0 + F_{\text{трМ}}$, $F = T_0 + F_{\text{тр}}$. Начинает действовать сила трения покоя, достигая максимума $F_{\text{трМ}}$, — предельный случай отсутствия перемещений в системе.
3. $F > T_0 + F_{\text{трМ}}$, $F = T + F_{\text{трМ}} + F_{\text{у.г.}}$. Движение пина возникает, при этом несколько меньшее трение скольжения ($F_{\text{тр.ск.}} < F_{\text{трМ}}$) способствует большему перемещению, и прекращается, когда неравновесие компенсируется возросшим натяжением и возникшей в связи со смещением силой упругости герметика.

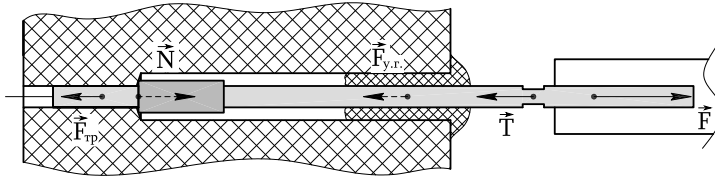


Рис. 17. Силы в системе проволочка-пин-отверстие

Таким образом, в интересующем нас последнем случае баланс сил распределяется между усилием F , максимальной силой трения покоя пина в отверстии $F_{\text{тр}M}$, возвратным действием герметика $F_{\text{у.г.}}$ и натяжением проволоочки T :

$$T = F - (F_{\text{тр}M} + F_{\text{у.г.}}). \quad (10)$$

Измерив две противодействующие силы в правой части последнего выражения, можно сделать вывод о степени механической защищённости проволоочек.

5.2. Движение пина из отверстия под нагрузкой

При решении вопроса о соотношении диаметров пина и отверстия качественно необходимо учитывать, с одной стороны, чтобы пин достаточно плотно входил в отверстие и, с другой стороны, не возникало сложностей во время ремонта при замене пина тонким специнструментом. Количественная оценка сделана в опыте по измерению силы выдёргивания пина (табл. 3). Здесь в отверстия в стеклотекстолите⁹⁾ вставлялись пины различных диаметров. Разумные величины усилий выдёргивания соответствуют диапазону диаметров трубки 0.990...1.000 мм, который и принят за норму.

Таблица 3. Усилие извлечения пина из отверстия

Диаметр трубки, мм	Сила, г
0.980	30...280
0.990	1300
0.995...0.998	~ 3000
1.010	> 7000

В процессе изготовления пинов с целью контроля их диаметра для каждой из партий трубок была сделана выборка. В данном случае нас интересуют длинные трубки, а именно те, на которые будут надеваться разьёмы ГРПМ1 для подачи электрического потенциала на проволоочку. В результате порядка 88% таких трубок находятся в пределах нор-

⁹⁾ Отверстия выбирались из числа первых, выполненных новым сверлом диаметром 1.000 мм в стеклотекстолите той же марки, из которого изготовлены фланцы ДК и её прототип. Общий объём сверловки при изготовлении ДК составляет порядка 32 тыс. отверстий. Но поскольку стеклоткань приводит к износу режущей кромки сверла, его ресурс установлен в 200 отверстий. Результирующий диаметр отверстия получается немного меньше по причине упругости стеклотекстолита, а вследствие износа сверла варьируется от 0.990 до 0.995 мм.

мы, 10% — превышают её¹⁰⁾, остальные 2% — ниже нормы. В отношении последних критичным является малость (или отсутствие) силы трения $F_{трМ}$ и, как следствие, вероятность обрыва проволоки при манипуляциях с разъёмами ГРПМ1. Более аккуратная оценка величины $F_{трМ}$, а также силы упругости герметика $F_{у.г.}$, предпринята в следующих опытах.

В отверстие в плите из стеклотекстолита (см. подстрочное примечание 9) вставлялся пин (рис. 18). Пространство между пином и большим отверстием заполнялось герметиком Loctite 5367. Таким образом, имитировалась реальная ситуация. Нагружая пин, по показаниям стрелки

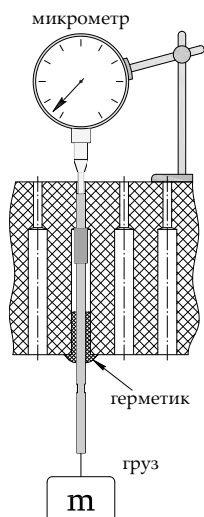


Рис. 18. Схема установки для определения трения пина в отверстии

индикатора определялось его смещение. Стартовая нагрузка, связанная с давлением индикаторной головки на пин, равна 50 г. Вес груза — до 800 г.

Измерения выполнены как для граничных значений нормальных диаметров трубок (0.990 и 1.000 мм), так и для трубок, имеющих отклонение диаметра в меньшую сторону от нормы (0.970 и 0.980 мм). Из опытных данных следует, что трубка $\varnothing 1.000$ мм под нагрузками до 800 г не смещается. Это согласуется с ранними измерениями (см. табл. 3). Результаты серий опытов для остальных диаметров отражены на рис. 19. Здесь вертикальная штриховая линия указывает нагрузку, при которой пин полностью освобождает отверстие.

Самые многочисленные и разноплановые результаты получены для $\varnothing 0.980$ мм. В первых трёх опытах пространство между пином и стенкой отверстия заполнялось герметиком на глубину не более 1.5–2 мм, и уже при незначительных нагрузках 100–150 г наблюдались смещение порядка 1 мм и последующее выдёргивание пина. Поэтому принято решение заполнять герметиком на глубину 4 мм

и в дальнейших испытаниях следовать этой установке. В таком случае пин держится до приложения силы в 400–500 г со смещением в среднем на 0.5 мм. Имеют место исключительные «удачные» случаи (см. рис. 19) малых смещений на предельных нагрузках (опыты 9 и 10) и даже пол-

¹⁰⁾ Из них основная часть ($\sim 95\%$) находится в пределах 1.001...1.005 мм. Эта доля также может быть отнесена к норме, поскольку длинные пины извлекать из отверстия проблемы собой не представляет.

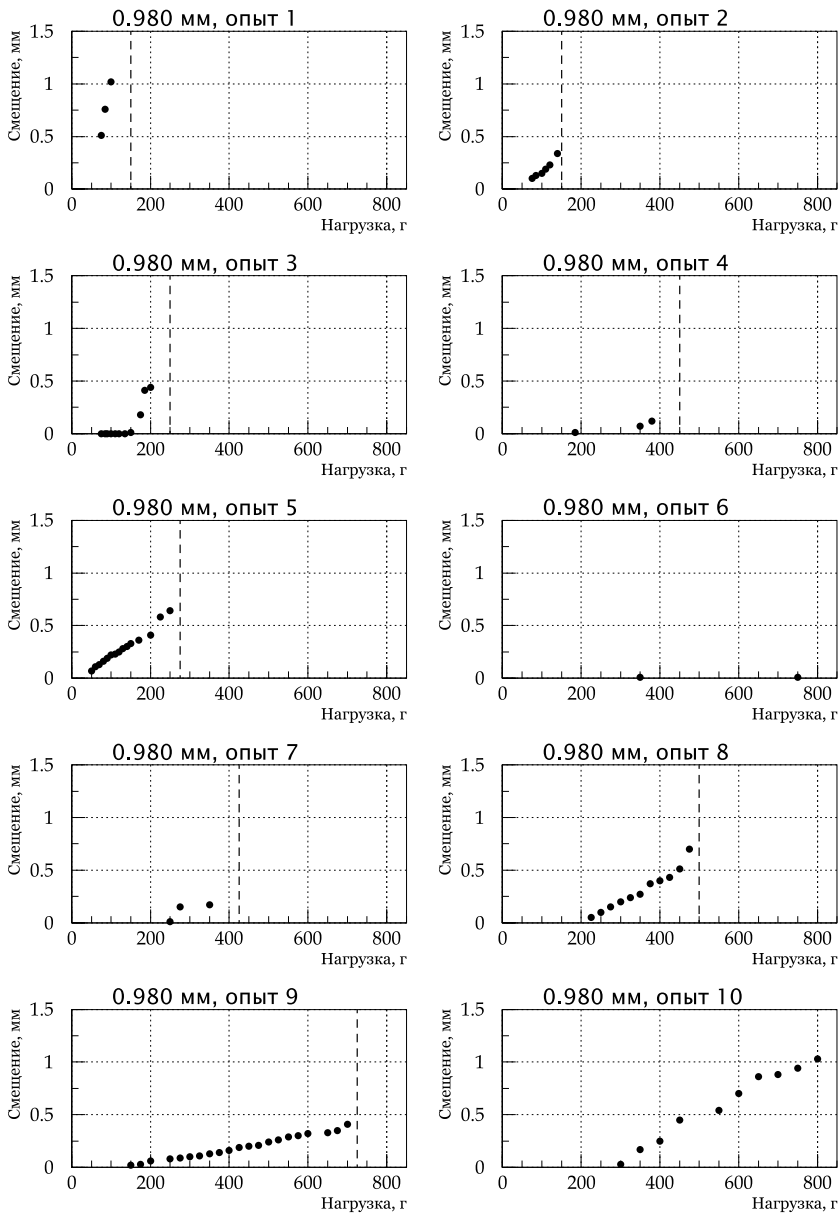


Рис. 19. Смещение пина в отверстии под нагрузкой

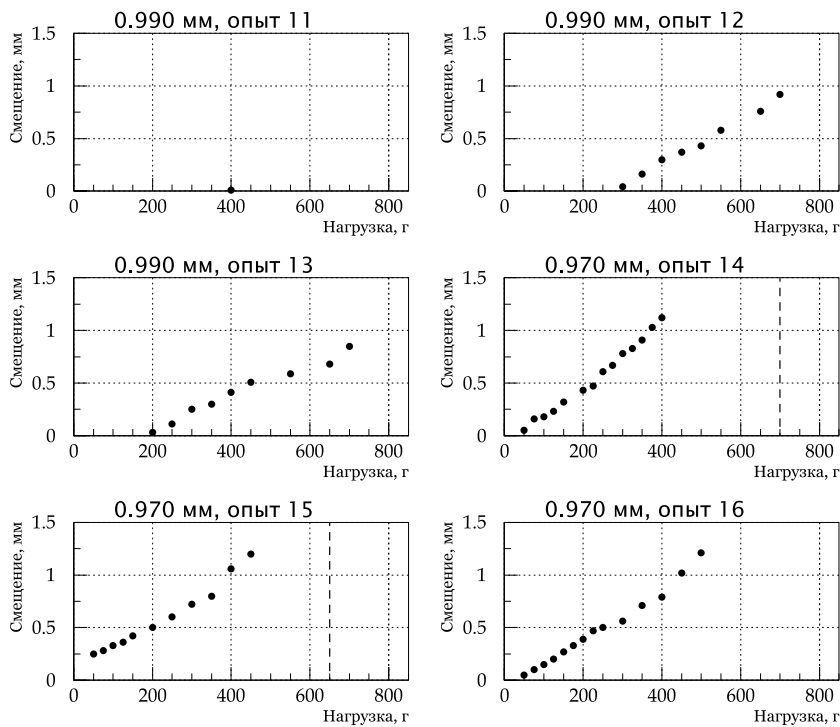


Рис. 19. Смещение пина в отверстии под нагрузкой (*продолжение*)

ного отсутствия движения (опыт 6). Причиной этого может быть: нецилиндричность пина, несколько более высокая шероховатость поверхности миллиметрового отверстия, наличие заусенцев на его кромке — и совокупное действие данных факторов.

Далее исследовалась трубка $\varnothing 0.990$ мм (опыты 11–13). Здесь пин уверенно держится благодаря герметику и на трении в отверстии вплоть до максимальных нагрузок, смещаясь менее чем на 1 мм. Выдёргивание не наблюдалось.

В последних трёх опытах проведены измерения с трубкой $\varnothing 0.970$ мм для оценки амортизационного эффекта герметика. Видно, что уже при минимальной нагрузке 50 г (давление индикаторной головки микрометра) присутствует некоторое смещение, растущее монотонно, в первом приближении — линейно, с увеличением нагрузки. Смещение на 1 мм достигается усилием в 400 г — такова степень фиксации пина в отверстии с помощью герметика.

5.3. Усилие снятия разъёма с пина

Для измерения усилия снятия разъёма с пина на трубку одевался новый разъём, к которому подвешивался груз, и вес постепенно наращивался до тех пор, пока трение в разъёме не превысит максимальное значение и контакт не разомкнётся. Кроме того, целью данного исследования являлась динамика измеряемой величины при многократном сопряжении гнезда с трубкой.

Контакт в разъёме ГРПМ1 обеспечивается шестью проволочками-пружинами, загнутыми по краю серебряного стакана внутрь и покрытыми золотом (рис. 20). Это позволяет добиться плотного соединения с низким контактным сопротивлением (не более 5 мОм).

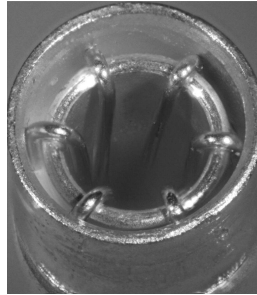


Рис. 20. Гнездо разъёма ГРПМ1

Была проведена серия опытов с образцами различного диаметра (рис. 21). Диаметры трубок выбирались из диапазона 0.980 . . . 1.010 мм, охватывающего норму 0.995 ± 0.005 мм. Следует отметить, что данные измерения лишь оценочные, поскольку гнезда ГРПМ1 не абсолютно идентичные, и в ряде случаев были отобраны измерения с максимальными значениями усилия; погрешность отдельного измерения равна 10 г. На малых диаметрах первоначальное усилие может составлять от 160 до 240 г, на нормативных диаметрах — от 250 до 285 г. На больших диаметрах трубки усилие не превышает 300 г и становится немного меньшим за счёт того, что снижается эффективная площадь контакта, когда потенциальная энергия пружины частично переходит в энергию обратно деформированной проволочки.

Каждая итерация замыкания-размыкания неминуемо приводит к стиранию золотого покрытия проволочек и, соответственно, спаду величины усилия снятия. Как видно из результатов, приведённых на рис. 21, это падение за 10 итераций составляет порядка 40%.

5.4. Выводы

Чтобы понять результат противодействия рассмотренных сил, удобнее переписать соотношение (10) как выражение для смещения пина. В отсутствие пластических деформаций натяжение проволочки меняется по линейному закону:

$$T = k_1 \cdot (x_0 + \Delta x), \quad (11)$$

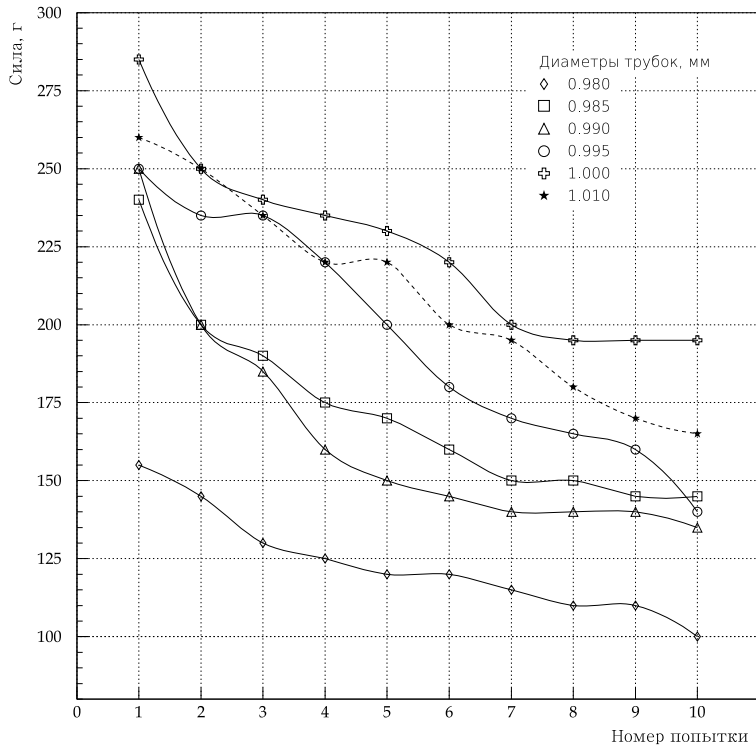


Рис. 21. Усилие снятия гнезда ГРПМ1 с трубок в зависимости от числа попыток

где k_1 — коэффициент упругости проволоки, x_0 — начальное растяжение проволоки, соответствующее натяжению T_0 , Δx — смещение пина. Пусть k_2 — коэффициент упругости герметика. Учитывая, что $F_{y.g.} = k_2 \Delta x$, ито-го для смещения пина получается выражение:

$$\Delta x = \frac{F - T_0 - F_{трМ}}{k_1 + k_2}. \quad (12)$$

Рассматриваем проволоку $\varnothing 70$ мкм из Ti/Cu/Au на длине 1 м и мак-симально неблагоприятный случай: $k_1 = 36$ г/мм, $T_0 = 100$ г, $F_{трМ} = 0$, $F = (F)_{\max} = 285$ г. В этих условиях

$$\Delta x = \frac{285 - 100}{36 + 400} \approx 0.4 \text{ мм.}$$

Из рис. 16 видно, что проволочка, будучи натянутой с силой 100 г, может быть дополнительно растянута на 3 мм, а деформации при этом останутся упругими. Поэтому рассчитанное удлинение 0.4 мм далеко не является критичным.

Вьясним, каково будет удлинение при отсутствии герметика при прочих тех же условиях. В этом случае $k_2=0$, а вся сила F окажется приложенной к проволоке и будет соответствовать её пределу текучести (см. рис. 16). Но поскольку эффект растяжения предполагается кратковременным, то пластическая деформация будет такой, что приведёт к падению силы натяжения на не более чем 10 г. Подобный спад натяжения для экранных проволочек является вполне допустимым с точки зрения требований к их электростатическим и гравитационным смещениям.

Наконец, сделаем аналогичную последней оценку для проволоки CFW $\varnothing 150$ мкм из Al/Ni/Au, для которой $k_1 = 124$ г/мм, $T_0 = 250$ г (см. рис. 6). Здесь деформации остаются упругими вплоть до натяжения 475 г с добавочным удлинением на 1.8 мм. В нашем же случае растяжение составит незначительную величину:

$$\Delta x = \frac{285 - 250}{124} \approx 0.3 \text{ мм.}$$

Из результатов проведённых измерений и расчётов следует, что немаловажную роль в сохранности экранных проволочек играет заполнение отверстий герметиком, поскольку его коэффициент упругости более чем в 10 раз превосходит коэффициент упругости проволоки. Но и в отсутствие герметика или его недостаточности те исключительные случаи, когда появились малые неупругие деформации, удовлетворяют требованиям к силе натяжения проволоки.

Заключение

В работе исследованы материалы, применяемые при изготовлении новой дрейфовой камеры и определяющие механическое состояние проволоочной структуры и её стабильность.

Изучены механические свойства новой алюминиевой проволоки диаметром 150 мкм производства компании CFW. Деформации находятся в области упругости вплоть до натяжения 475 г; предел прочности составляет около 800 г. Экспериментальным образом получена оценка коэффициента теплового расширения, которая согласуется со справочными данными для сплава Al5056 и приблизительно равна $25 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

В свою очередь, это позволило измерить, насколько сильно проволока подвержена неупругим деформациям вследствие ползучести её материала. Оказалось, что при постоянном рабочем натяжении 250 г за 10 суток образец длиной 1 м удлинится на 60 мкм, что эквивалентно уменьшению натяжения проволоочки в камере примерно на 8 г.

Более подробно явление ползучести изучено благодаря измерениям релаксационного уменьшения натяжения. По результатам 3-летних измерений предсказано, что за время эксплуатации ДК (порядка 10 лет) натяжение алюминиевой проволоки снизится не более чем на 30%. Для титановой проволоки, использовавшейся в старой ДК, эта величина составила 10%. С учётом полученных данных предложено минимальное натяжение алюминиевой проволоки, равное 270 г.

Для четырёх видов пинов, с помощью которых проволоочки крепятся на торцах ДК, подобраны толщины обжима. Проведены контрольные опыты на движение нагруженной проволоки в обжатой трубке пина. Результаты показали, что все проволоочки будут закреплены в пинах надёжно.

Возможность провисания или обрыва проволоочек в процессе эксплуатации и ремонта исследована на примере наименее защищённых экранных проволоочек. Рассмотрены силы, действующие в системе крепления проволоочек на торцевых пластинах, выполнены измерения силы трения пина в отверстии в плите из стеклотекстолита, измерены усилия снятия разъёма ГРПМ1 с пина. Полученные результаты позволяют утверждать, что при условии заполнения отверстий герметиком, который фиксирует пин, практически исключаются случаи повреждения проволоки. Отсутствие герметизирующей связки может вызвать малые неупругие деформации проволоки, которые, однако, являются допустимыми.

Благодарности

Автор выражает благодарность В. Е. Блинову за поддержку работы и полезные замечания при обсуждении результатов, В. А. Родякину и А. С. Старостину за ценные советы при рассмотрении методик исследований и участие в измерениях, а также Н. В. Плюснину за изготовление испытательных стендов и помощь в проведении измерений.

Список литературы

- [1] Anashin V. V. et al. The KEDR detector // *Physics of particles and nuclei*. — 2013. — Vol. 44. — №4. — PP. 657-702.
- [2] Блинов В. Е., Присекин В. Г. Исследование катодного старения и порога возникновения автоэмиссии с катодных проволочек в дрейфовых камерах. Препринт ИЯФ 2011-2.
- [3] Malter L. Thin Film Field Emission // *Phys. Rev.* — 1936. — Vol. 50. — PP. 48–58.
- [4] Тельнов В. И. Расчёт натяжения проволочек в пропорциональных камерах // *ПТЭ*. — 1974. — №5. — С. 46–47.
- [5] Борздыка А. М., Гецов Л. Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. — М.: Металлургия, 1972.

И. Ю. Басок

**Механическая стабильность проволочной
структуры дрейфовой камеры
детектора КЕДР**

I. Yu. Basok

**Mechanical stability of wire structure
of the KEDR drift chamber**

Budker INP 2013-16

Ответственный за выпуск А. В. Васильев

Работа поступила 22.08.2013 г.

Сдано в набор 26.08.2013 г.

Подписано в печать 27.08.2013 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2.2 печ.л., 1.8 уч.-изд.л.

Тираж 90 экз. Бесплатно. Заказ № 16

Обработано на РС и отпечатано на
ротапринте «ИЯФ им. Г. И. Будкера» СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.