

Стенд для исследования характеристик строу

А. Д. Волков, М. Д. Кравченко, А. В. Павлов

Приводятся конструкция и технические параметры стенда, предназначенного для исследования характеристик тонкостенных трубок – строу (straw). Описана методика и представлены результаты измерений характеристик строу диаметром 9,8 мм и толщиной стенки 20 мкм. Определена область упругой деформации, которая простирается до натяжения $(1,850 \pm 0,002)$ кгс. Натяжение, превышающее эту величину, приводит к упруго-пластической деформации, при которой возрастают скорость релаксации натяжения и ползучесть материала строу. Измерен модуль упругости материала трубки, составляющий $(4,44 \pm 0,05) \times 10^9$ Н/м². Результаты исследований температурной зависимости модуля упругости позволяют выбрать оптимальную температуру работы строу-детектора. Определен коэффициент Пуассона материала трубки, требуемый для оценки изменения её натяжения в вакууме. Его величина составила $0,338 \pm 0,004$. Для процесса релаксации впервые рассматривается наличие квазипостоянного остаточного натяжения на временном интервале срока службы детектора, определяемого величиной начального натяжения строу. Представленные результаты показывают высокую точность измерений.

Ключевые слова: стенд, тонкостенные строу, характеристики строу, релаксация натяжения.

Ссылка: Волков А. Д., Кравченко М. Д., Павлов А. В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 1. С. 76.

Reference: A. D. Volkov, M. D. Kravchenko, and A. V. Pavlov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (1), 76 (2019).

Введение

В технике современного эксперимента все более широкое применение находят координатные газонаполненные проволочные детекторы на основе тонкостенных трубок из пленки полиэтилен-терефталата – строу (от англ. straw – соломинка) [1, 2]. Данный тип детекторов имеет ряд преимуществ: малая радиационная толщина детектора, цилиндрическая геометрия для каждого канала регистрации обеспечивает оптимальный временной сбор электронов ионизации, дрейфующих к аноду.

В собранном виде совокупность строу представляет собой цилиндрический дрейфовый детектор. Внутренняя поверхность пленки покрывается тонким слоем металла, который служит катодом. Одновременно катод является экраном, уменьша-

ющим взаимное влияние сработавших строу. Сигнальная проволочка крепится в контактах, расположенных в концевиках строу, и служит анодом детектора. Помимо контактов, концевики имеют отверстия для подачи внутрь строу рабочей газовой смеси.

Детекторы на базе строу имеют простую конструкцию и обладают высокой надежностью [3, 4]. Для обеспечения высокой координатной точности регистрируемого события для строу детектора требуется прецизионное позиционирование проволочки внутри трубки и самих трубок в модулях детектора. К материалу строу предъявляются требования к длительному сохранению его основных механических свойств, а также к однородности самого материала. Применительно к строу-детекторам наиболее важными свойствами материала самой строу являются область упругой деформации, значение модуля упругости, который характеризует прочность строу, скорость и величина релаксации натяжения. Эти параметры в значительной степени влияют на выбор конструкции детектора и срок службы строу в эксперименте. Знание коэффициента Пуассона требуется для выбора предварительного натяжения строу при её работе в вакууме, поскольку в этом случае перепад давления вызывает изменение её натяжения [5].

Волков Александр Дмитриевич, н.с.
Кравченко Михаил Дмитриевич, м.н.с.
Павлов Алексей Викторович, м.н.с.
Объединенный институт ядерных исследований.
Россия, 141980, Московская область, г. Дубна,
ул. Жолио-Кюри, 6.
E-mail: kmd@jinr.ru

Статья поступила в редакцию 16 января 2019 г.

© Волков А. Д., Кравченко М. М., Павлов А. В., 2019

Целью данной работы являлось создание стенда для исследования свойств строу в лабораторных условиях, определение оптимальных условий для работы строу в составе детектора и оценка срока его службы.

Конструкция стенда

В основе данного стенда лежит замысел достаточно простой конструкции, позволяющей перестраивать, добавлять или удалять рабочие узлы и механизмы для проведения широкого спектра измерений характеристик трубок. На рис. 1 представлена конструкция стенда в вертикальном разрезе. Основными узлами стенда являются:

- металлическое основание, с закрепленным на нем герметичным корпусом из оргстекла;
- исследуемая строу с концевиками и системой её натяжения;
- цифровой динамометр для измерения натяжения строу, на линии с ЭВМ по каналу USB;
- цифровой датчик температуры и влажности под управлением контроллера Arduino, подключенного к ЭВМ;
- нагревательный и охлаждающий элементы;
- вентиляторы для обдува и циркуляции воздуха;
- диффузор с отверстиями;

- съемный блок с влагопоглощающим веществом;
- система газообеспечения строу.

Для исследования характеристик трубки в её концы вклеиваются концевики. Один концевик исследуемой строу соединяется с динамометром, жестко закрепленным на основании стенда. В другом концевике крепится система натяжения строу на основе винта. Стенд имеет систему стабилизации температуры и влажности в заданном диапазоне. Для равномерной и плавной циркуляции воздушных масс внутри стенда применяются вентиляторы и диффузор с отверстиями, разделяющий области размещения трубки и верхней части корпуса. Все вышеуказанные узлы стенда заключены в герметичный объем, образованный основанием и кожухом, выполненным из оргстекла. Также в состав стенда входит система стабилизации влажности, в качестве которой может быть использован съемный элемент с влагопоглощающим веществом – силикагелем. Рабочая температура внутри стенда выбирается исходя из особенностей и характера конкретного проводимого измерения. Например, для краткосрочных измерений применение вышеописанных систем стабилизации параметров воздуха не является обязательным. Для долгосрочных измерений в состав стенда могут включаться те системы, которые стабилизируют наиболее критичные для измерения параметры воздуха.

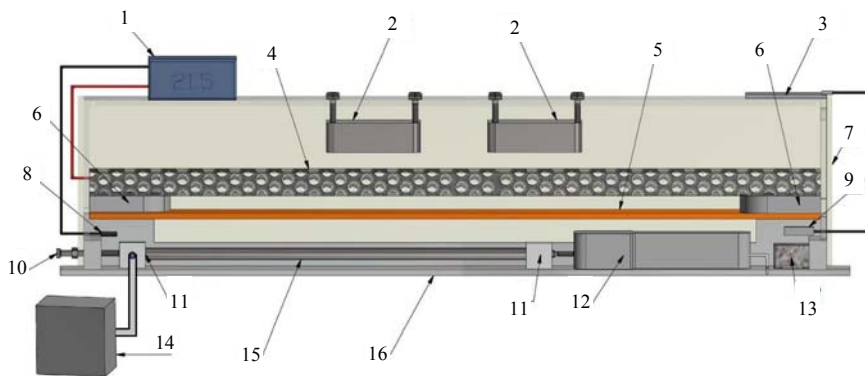


Рис. 1. Вид стенда в вертикальном разрезе: 1 – терморегулятор, 2 – вентиляторы для обдува и циркуляции воздуха, 3 – контроллер Arduino, 4 – нагревательный и охлаждающий элементы в корпусе, 5 – диффузор, 6 – центробежные вентиляторы, 7 – корпус из оргстекла, 8 – датчик температуры терморегулятора, 9 – цифровой датчик температуры и влажности контроллера Arduino, 10 – система натяжения строу, 11 – концевики строу, 12 – цифровой динамометр, 13 – съемный блок с влагопоглощающим веществом, 14 – система газообеспечения строу, 15 – строу-трубка, 16 – основание.

Поддержание постоянной температуры внутри стенда осуществляется с помощью терморегулятора, который соединен с датчиком температуры, расположенным внутри стенда в области строу. В случае отклонения температуры внутри стенда от заданной величины порога срабатывания в терморегуляторе замыкается одно из реле, подающее питание на нагревательный или охлаждающий элемент. Размыкание соответствующего реле происходит после достижения заданного температурного значения. Цифровой динамометр подключается к персональному компьютеру по интерфейсу

USB. Управление рабочими параметрами динамометра и прием данных осуществляется надстройкой в программе функционирования динамометра, написанной на языке Visual Basic и модернизированной авторами. Для дополнительного контроля стабильности температуры и влажности во внутреннюю область стенда со строу помещен цифровой датчик температуры и влажности. Датчик соединен с контроллером Arduino, подключенным к персональному компьютеру. Программа управления контроллером Arduino написана авторами на языке Си. На рис. 2 показан общий вид стенда.

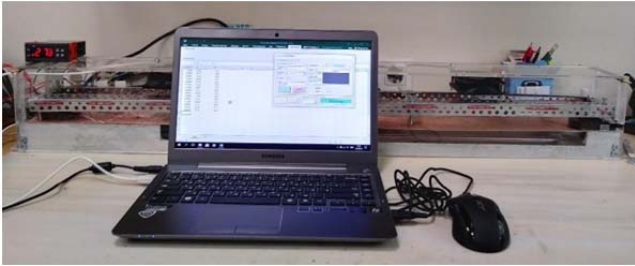


Рис. 2. Общий вид стенда.

Технические параметры стенда

Стенд включает следующие измерительные приборы:

- контроллер RC-316M фирмы Xuzhou Ringder Electrical Equipment Co., LTD [6], используемый для управления нагревательным и охлаждающим элементами;
- цифровой динамометр Strain gauge FGP-2 компании NIDEC-SHIMPO Instr. [7];
- контроллер Arduino Uno R3 [8], включающий датчики температуры и влажности DHT22 [9].

Основные параметры стенда приведены в таблице. Наличие в составе стенда высокоточного динамометра, системы термостабилизации и осушения воздуха, блока натяжения строу, системы газообеспечения позволяет исследовать на стенде различные характеристики строу с высокой точностью. На стенде можно определять область упругой деформации и модуль упругости, определять коэффициент Пуассона, исследовать температурную зависимость модуля упругости и коэффициента Пуассона, релаксацию натяжения материала строу. Исследование свойств строу позволяет выбрать её натяжение, обеспечивающее требуемый срок службы в эксперименте, особенно при работе в вакууме.

Таблица

Основные параметры стенда

Параметр	Значение
Рабочая температура внутри стенда	20–27 °C
Стабильность поддерживаемой температуры	±0,5 °C
Длина исследуемой строу	до 63 см
Натяжение строу	0–2 кгс
Интервал времени между отсчётами данных	задается в программе
Соединение с компьютером	USB интерфейс

Методика измерений и обсуждение результатов

Измерения проводились на сварных строу [10] из полиэтилентерефталата $(C_{10}H_8O_4)_n$ диаметром 9,75 мм, толщиной стенки 20 мкм, с односторонней металлизацией алюминием толщиной 70 нм.

Строу имеют площадь поперечного сечения 0,613 мм². Пленка для производства строу была произведена ООО НПП «ПОЛИПЛЕН». Характеристики полиэтилентерефталата приведены в [11, 12].

Зависимость продольной деформации строу от напряжения

На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость относительной деформации строу ε от величины продольного напряжения σ , которая задается силой натяжения строу.

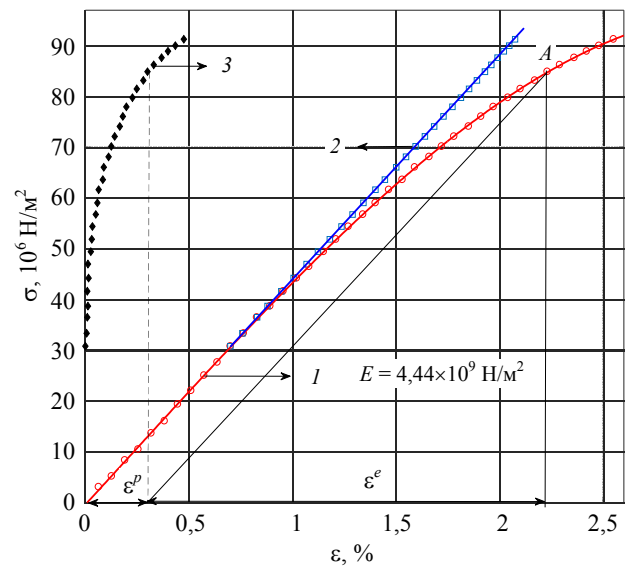


Рис. 3. Области упругой и пластической деформации строу.

Это и последующие измерения проводились при температуре 23 °C, если не указано иное. Величина напряжения σ определялась после релаксации натяжения в течение двух минут. С использованием данной зависимости определяются области упругой и пластической деформации, модуль упругости материала строу. Сила натяжения измерялась с помощью динамометра, точность которого составляет ± 1 гс [7]. Продольная деформация строу задавалась перемещением концевика с закрепленным в нем винтом. Перемещение концевика осуществляется путем вращения гайки при ее постоянном положении относительно поперечной планки, которая жестко связана с основанием (см. рис. 1). Один оборот гайки вдоль винта с резьбой M5 вызывает удлинение трубки на 0,8 мм. Поскольку гайка имеет шесть граней, продольную деформацию строу можно измерять с точностью поворота гайки на 0,5 грани, что соответствует ошибке удлинения ± 33 мкм, а относительная ошибка продольной деформации составит менее 0,01 %. Для большинства используемых в детекторах строу их натяжение превышает 1 кгс, поэтому ошибка, вносимая измерением натяжения,

не превышает 0,1 %. Результаты измерения относительной деформации представлены линией 1 на рис. 3.

До напряжения 30×10^6 Н/м² зависимость носит линейный характер, а деформация является упругой и подчиняется закону Гука $\sigma = \varepsilon E$ [13–15], где E – модуль упругости (модуль Юнга). Указанная величина напряжения соответствует натяжению трубки (1850 ± 2) гс, которое служит границей области упругого напряжения. Превышение натяжения данной величины вызывает появление пластической составляющей деформации, при которой возрастают скорость релаксации натяжения и ползучесть материала строу, а сама зависимость становится нелинейной. Пример определения величины пластической деформации в точке A (на продолжении линии 1) показан на рис. 3, где ε^p и ε^e – соответственно относительные составляющие пластической и упругой деформации. Зависимость пластической деформации от напряжения на рис. 3 представлена маркерами 3. Для сравнения, прямая 2 иллюстрирует случай наличия только упругой деформации.

Модуль упругости E определялся по результатам полученных данных в линейной области в соответствии с ГОСТ 9550-81. Его значение равно тангенсу угла наклона зависимости, которое составило $E = (4,44 \pm 0,05) \times 10^9$ Н/м². Точность измерения модуля упругости материала строу превышает табличные данные и, самое главное, его значение соответствует значению для материала изготовленной строу. Свойства материала при воздействии температурной обработки в процессе создания строу могут изменяться.

Зависимость модуля упругости от температуры

На рис. 4 приведены результаты исследования температурной зависимости модуля упругости E . Модуль упругости определялся для заданной температуры в линейном диапазоне деформации строу аналогичным образом, описанным выше. В этом тесте величина натяжения регистрировалась непосредственно после деформации строу без учета её релаксации.

Зависимость показывает, что величина модуля в интервале температур (12–22) °С больше, что вызывает меньшую деформацию и ползучесть строу. С ростом температуры модуль упругости уменьшается линейно с наклоном $0,025 \times 10^9$ Н/(м² °С). Падение вызывается тепловыми фоновыми в структуре материала [16, 17]. В интервале температур (23–28) °С происходит более резкое уменьшение значения модуля упругости, обусловленное тепловым движением электронов прово-

димости. Полученная для данного материала зависимость аналогична приведенной в работе [16].

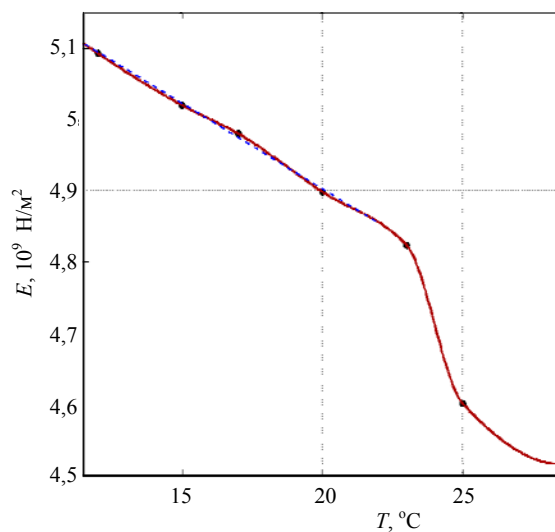


Рис. 4. Зависимость модуля упругости E от температуры T .

С учетом приведенной зависимости в эксперименте температуру в помещении строу-детектора следует поддерживать в диапазоне (12–22) °С. Поведение температурной зависимости модуля упругости для различных пластических материалов будет аналогичным, но температурный диапазон и скорость изменения модуля могут меняться. Поэтому для выбора оптимального режима работы строу требуется проверка данной зависимости.

Зависимость модуля упругости от толщины строу

Следует отметить зависимость модуля упругости от толщины стенки строу, которая представлена на рис. 5. Величина модуля уменьшается с ростом толщины стенки строу. Этот эффект авторы связывают с технологией производства пленки для изготовления строу. Технология изготовления тонкой пленки включает прокатку более толстой пленки между валиками с меньшим зазором между ними, по сравнению с толщиной исходной пленки. Получение тонкой пленки требует многократной прокатки. При этом происходит перестройка волокон материала в продольном направлении и их упрочнение под действием силы со стороны валиков, направленной перпендикулярно поверхности пленки. Эти процессы будут вызывать уменьшение продольной деформации трубки при её натяжении, что характеризует более высокое значение модуля упругости (см. рис. 5). Троекратное увеличение толщины пленки привело к уменьшению значения модуля на 32 %.

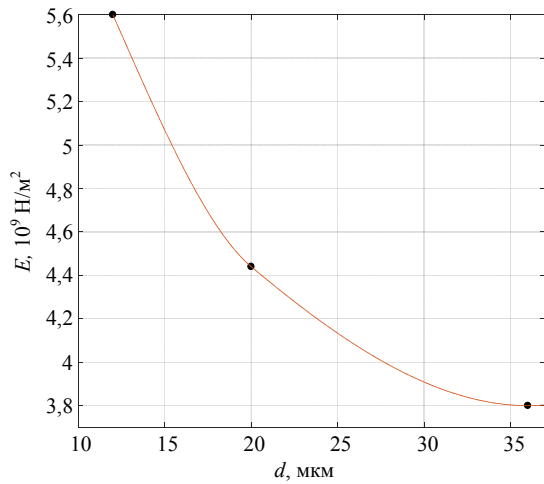


Рис. 5. Зависимость модуля упругости E от толщины d стенки строу.

Влияние перепада давления

Важным фактором, влияющим на натяжение строу при работе в вакууме, является перепад внутреннего и внешнего давления. При фиксированных концах строу перепад давления вызывает в ней касательное напряжение, которое, согласно [18], дает продольную составляющую. Величина продольной составляющей зависит от значения коэффициента Пуассона материала строу. Его значение можно определить по зависимости изменения показаний динамометра от величины перепада давления, показанной на рис. 6 для различных значений начального натяжения строу.

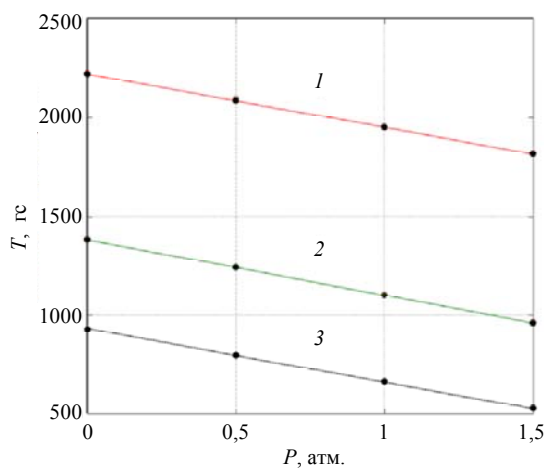


Рис. 6. Влияние перепада давления P на натяжение T строу (по показаниям динамометра) для различных значений начального натяжения строу.

Для приведенной зависимости следует учитывать, что динамометр регистрирует значение равнодействующей силы, которая определяется силой предварительного натяжения строу и силой давления, действующей на внутреннюю торцевую поверхность концевика и цилиндрическую поверх-

ность строу. Сила давления на торцевую поверхность концевика уменьшает показание динамометра, а давление на цилиндрическую поверхность строу приводит к увеличению натяжения и показания динамометра. Поскольку сила давления на торцевую поверхность концевика превышает действие сил касательного напряжения и поперечной силы, действующих на стенку строу, с увеличением перепада давления показания динамометра уменьшаются. Результатом действия перепада давления является увеличение натяжения строу на (482 ± 1) гс/атм.

Метод вычисления значения коэффициента Пуассона описан в [5]. Для исследуемой строу его величина составила $0,338 \pm 0,004$. Погрешность при вычислении связана с ошибкой определения показания динамометра и датчика давления.

Релаксация натяжения строу

Натяжение строу при её фиксированной длине подвержено релаксации. Релаксация натяжения (stress relaxation) – это процесс уменьшения напряжения внутри материала и его натяжения. Поэтому в эксперименте требуется обеспечить натяжение строу, при котором долговременно сохраняются цилиндрическая форма и требуемая точность регистрации события. Данное исследование является долгосрочным, с непрерывной записью данных. Для стабилизации параметров воздуха в этом тесте была задействована система нагрева. Внутри стенда поддерживалась температура $(27 \pm 0,5)$ °С, которая в лабораторных условиях обеспечивала стабильную работу системы термостабилизации в течение всего года. Отсчеты натяжения производились автоматически с изменяемым в управляющей программе интервалом времени. Синхронно с измерением натяжения производилась регистрация значения влажности для мониторинга данного параметра.

На рис. 7 представлена релаксация натяжения строу на начальной стадии.

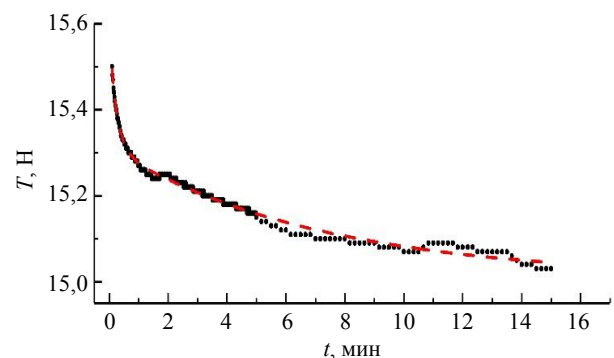


Рис. 7. Релаксация натяжения на начальной стадии.

Временной интервал регистрации натяжения составил 15 минут. В течение этого периода влаж-

ность и температура остаются практически постоянными, и процесс релаксации протекает в одинаковых климатических условиях. В первые две минуты происходит наиболее резкое падение натяжения на 1,6 %, после чего скорость релаксации натяжения падает.

На рис. 8 представлены данные по релаксации натяжения в течение 150 дней.

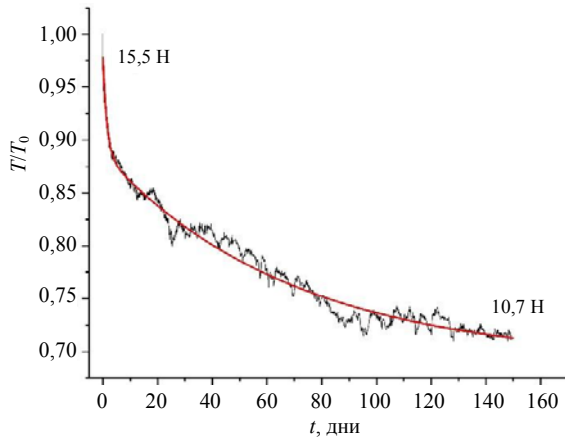


Рис. 8. Релаксация натяжения в течение 150 дней.

Релаксация напряжения протекает благодаря двум основным механизмам: физической и химической релаксации. На стадии физической релаксации происходит перегруппировка и перестройка молекулярной и надмолекулярной структуры материала, а стадия химической релаксации включает перестройку химических связей внутри материала. Первый механизм представляет быструю компоненту релаксации, а второй — наиболее медленную. В связи с этим, из ряда аппроксимирующих функций была выбрана функция, включающая две экспоненты и свободный член (красная линия на рис. 8).

Данная функция наилучшим образом описывает экспериментальные данные и учитывает факт заметного падения скорости релаксации, начиная с 90-го дня (рис. 9).

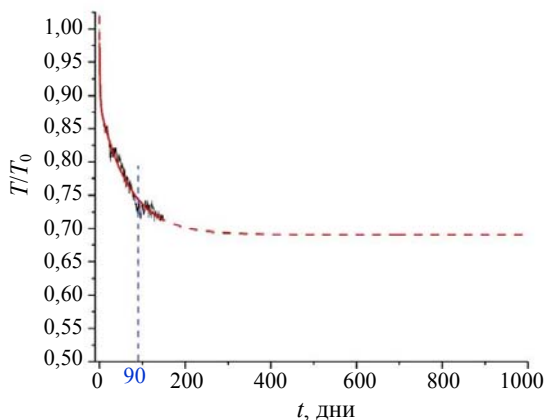


Рис. 9. Длительная релаксация натяжения.

Экспоненциальные члены описывают быстрый и медленный процесс релаксации с постоянными времени $\tau_1 = 1,45$ дня и $\tau_2 = 68,9$ дней. На рис. 9 показана экстраполяция данных до 1000 дней. Этот временной интервал является характерным сроком использования детектора в эксперименте. Важным фактом, отмеченным авторами впервые для сварных строу, является наличие квазипостоянного остаточного натяжения на временном масштабе типичного срока службы детектора. В длительном интервале времени натяжение строу не падает до нуля, а уменьшается далее с крайне большой постоянной времени, позволяющей пренебречь остаточной релаксацией. Величина остаточного натяжения при длительной релаксации $T_{\text{ост}}$ описывается выражением:

$$T_{\text{ост}} = (T_{\text{нач}} + T_{\text{вак}} P) K_{\text{релакс}},$$

где $T_{\text{нач}}$ — начальное натяжение, выраженное в ньютонах, $T_{\text{вак}}$ — увеличение натяжения в вакууме, равное 482 гс/атм, P — перепад давления, выраженный в атмосферах, $K_{\text{релакс}}$ — коэффициент релаксации. Исследование релаксации натяжения при атмосферном давлении позволяет определить коэффициент релаксации $K_{\text{релакс}} = T_{\text{ост}} / T_{\text{нач}} \approx 0,69$. В течение 150 дней натяжение упало с 15,5 до 10,7 Н. Наличие квазипостоянного остаточного члена натяжения позволяет выбрать оптимальное начальное натяжение строу для работы в вакууме по формуле:

$$T_{\text{нач}}^{\text{опт}} = T_{\text{ост}}^{\text{необх}} / K_{\text{релакс}} - T_{\text{вак}} P,$$

где $T_{\text{нач}}^{\text{опт}}$ — оптимальное начальное натяжение трубки; $T_{\text{ост}}^{\text{необх}}$ — необходимое остаточное натяжение, обеспечивающее требуемое координатное разрешение. Например, натяжение строу с силой $T_0 = 1,23$ кгс обеспечит её длительную работу в вакууме практически при постоянном натяжении. Релаксация натяжения за время сборки детектора будет компенсирована увеличением натяжения в вакууме, которое через 7–8 месяцев стабилизируется на уровне 1,2 кгс. Влияние релаксации с ошибкой менее 5 % заканчивается через 90–110 дней (рис. 9).

Результаты исследования релаксации натяжения двуслойных склеенных строу диаметром 5 мм и толщиной 15 мкм, представленные в [19, 20], являются противоречивыми. Исследования релаксации натяжения и оценка срока работы строу велись при начальном натяжении в диапазоне 400–700 гс, которое соответствует переходной области деформации (см. рис. 10).

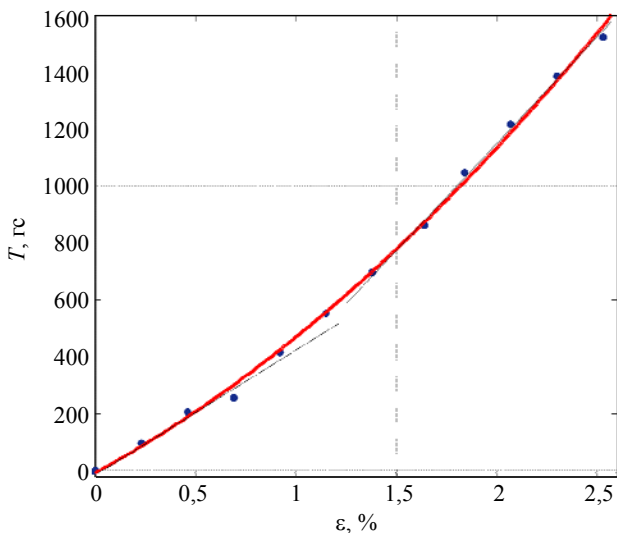


Рис. 10. Поведение деформации клеенных строу.

Область упругой деформации простирается до натяжения строу в 250 гс. Модуль упругости в этой области равен $1,78 \times 10^9$ Н/м². В интервале натяжения 250–700 гс наблюдается падение скорости относительной деформации и увеличение значения модуля упругости. При натяжении свыше 700 гс деформация вновь принимает линейный характер. Причем скорость деформации по сравнению со скоростью деформации на начальном участке упала практически в два раза, а модуль упругости увеличился до значения $2,705 \times 10^9$ Н/м². В обоих случаях при сравнимых толщинах строу и равных напряжениях порядка 25×10^6 Н/м² значение модуля упругости клеенных строу в указанном диапазоне натяжений на 40 % меньше, чем для сварных строу толщиной 20 мкм, которое составляет $4,44 \times 10^9$ Н/м². Отсутствие характерной области пластической деформации, где скорость деформации наоборот возрастает, и наличие второго участка линейной деформации строу, по мнению авторов, может быть связано с технологией изготовления строу методом склеивания двух слоев пленки и её намотки на стержень под углом. Натяжение строу будет вызывать напряжения в ортогональных направлениях пленки X и Y , которые делают процесс деформации двунаправленным и могут приводить к скользянию слоев пленки друг относительно друга, особенно при высыхании клея. Сложное напряжение материала строу при её натяжении может приводить к перестройке материала на молекулярном уровне. Наличие двух участков линейной деформации, возможно, является следствием указанных причин.

Заключение

Результаты работы включают стенд для исследования характеристик тонкостенных строу.

Работа стенда была проверена при исследовании строу из полиэтилентерефталата диаметром 9,8 мм и толщиной стенки 20 мкм. Для данного типа строу получены важные характеристики. Определено предельное напряжение упругой деформации, равное 30×10^6 Н/м². В области упругой деформации релаксация натяжения и ползучесть материала строу имеют минимальную величину. Определено значение модуля упругости материала строу, величина которого составила $(4,44 \pm 0,05) \times 10^9$ Н/м². Испытания показали, что сварные строу по сравнению с двуслойными клеенными строу имеют лучшие упругие свойства.

Исследована зависимость модуля упругости от температуры. Для работы строу в эксперименте рекомендован температурный режим (12–22) °С. В этом диапазоне значение модуля упругости максимально. С увеличением температуры величина модуля упругости уменьшается пропорционально $0,025 \times 10^9$ Н/(м² °С).

Определено значение коэффициента Пуассона, равное $0,338 \pm 0,004$. Значение коэффициента Пуассона требуется для учета влияния перепада давления на натяжение строу при её работе в вакууме, которое вызывает его увеличение на 482 ± 1 гс.

Исследована зависимость релаксации натяжения во времени. Впервые показано наличие у сварных строу квазипостоянного члена при релаксации натяжения на временном масштабе типичного срока службы трекера. Коэффициент релаксации натяжения в интервале 150 дней составил 0,69. Определена функция релаксации натяжения, которая содержит две экспоненты, затухающие во времени с постоянными: $\tau_1 = 1,45$ дня и $\tau_2 = 68,9$ дней. При релаксации натяжения более 8 месяцев его натяжение уменьшается со столь малой скоростью, что можно пренебречь остаточной релаксацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hahn F. et al. NA62 Technical Design Document. CERN, NA62 – 10-07. 2010.
2. Kuno Y. et al. Experimental Proposal for Phase-1 of the COMET Experiment at J-PARC. KEK/J-PARC-PAC 2012-10.
3. Кекелидзе Г. Д., Пешехонов В. Д. // ЭЧАЯ (Физика элементарных частиц и атомного ядра). 2002. Т. 33. № 3. С. 669.
4. Пешехонов В. Д. // ЭЧАЯ/ 2015. Т. 46. № 1. С. 167.
5. Волков А. Д. и др. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 1. С. 83.
6. http://minifermer.ru/product_1211.html
7. <http://shimpoinstruments/product/FGV-XY>
8. <https://www.chipdip.ru/product/arduino-uno-r3>
9. <https://www.chipdip.ru/product/dht22-temperature-humidity-sensor>
10. Азорский Н. И. и др. // ЭЧАЯ. 2017. Т. 14. № 1. С. 92.

11. Новые химические технологии. Аналитический портал химической промышленности. Термопласты. Полиэтилентерефталат. www.newchemistry.ru
12. Керницкий В. И., Жир Н. А. // Полимерные материалы. 2014. № 8. С. 11.
13. Alexander Mendelson. Plasticity: Theory and Application.
14. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – Машиностроение, 1975.
15. Биргер И. А., Мавлютов Р. Р. Сопротивление материалов. – Наука, 1986.
16. Pandini S., Pegoretti A. // XPRESS Polymer Letters. 2011. Vol. 5. No. 8. P. 685.
17. Паль-Валь Л. Н и др. // Конденсированные среды и межфазные границы. 2008. Т. 10. № 3. С. 226.
18. Calladine C. R. Theory of shells structures. Cambridge Univ. – Press, 1983.
19. Bono J. S. et al. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. 2018. Vol. 902. P. 95.
20. Seog H. Oh., Chiho Wang. Mu2e Straw Creep Measurements, Technical Note, DUKHEP-2015-09-14.

PACS: 06.60 Mr, 07.05 Bx

The test bench to study the characteristic of straw tubes

A. D. Volkov, M. D. Kravchenko, and A. V. Pavlov

Joint Institute for Nuclear Research
6 Joliot-Curie st., Dubna, Moscow Region, 141980, Russia
E-mail: kmd@jinr.ru

Received January 16, 2019

The design and technical parameters of the stand developed to study the characteristics of thin-walled tubes (straw) are given. The method of measuring straw characteristics with a diameter of 9.8 mm and a wall thickness of 20 μm is described and the results are presented. The area of elastic deformation, which extends to a tension of (1.85 ± 0.02) kgf, was determined. A tension more than this value leads to elastoplastic deformation at which the tension relaxation and creep rate of the straw material increases. The elastic modulus of the tube material, which is equal to $(4.44 \pm 0.05) \times 10^9$ N/m², was measured. The results of the elasticity modulus' temperature dependence studies allow selecting the optimal operating temperature for straw detector. The Poisson's ratio of the tube material, which is required to estimate the change in its tension in vacuum, was determined. Its value was $0.338 \pm 0,004$. For a relaxation process, the presence of a semi-permanent residual tension on the time scale of a typical tracker lifetime, which depends on the choice of the initial straw tension, was considered for the first time. The presented results show high accuracy of the measurements.

Keywords: test bench, thin-wall straw, straw properties, tension relaxation.

REFERENCES

1. F. Hahn et al., NA62 Technical Design Document. (CERN, NA62 – 10-07. 2010).
2. Kuno Y. et al., Experimental Proposal for Phase-1 of the COMET Experiment at J-PARC. (KEK/J-PARC-PAC 2012-10).
3. G. Kekelidze and V. Peshekhonov, PEPAN Letters **33** (3), 669 (2002).
4. V. Peshekhonov, PEPAN **46** (1), 167 (2015).
5. A. D. Volkov et al., Usp. Prikl. Fiz. **6** (1), 83 (2018).
6. http://minifermer.ru/product_1211.html
7. <http://shimpoinstruments/product/FGV-XY>
8. <https://www.chipdip.ru/product/arduino-uno-r3>
9. <https://www.chipdip.ru/product/dht22-temperatute-humidity-sensor>
10. N. Azorskiy et al., PEPAN **14** (1), 92 (2017).
11. New chemical technologies. Analytical portal of chemical industry. Thermoplastics. Terephthalate. www.newchemistry.ru
12. V. I. Kermitsky and N. A. Jir, Polymeric materials, No. 8, 11 (2014),
13. A. Mendelson, Plasticity: Theory and Application.
14. N. N. Malinin, Applied Theory of Plasticity and Creep. (Mashinostroenie, 1975) [in Russian].
15. I. A. Birger and R. R. Mavlyutov, Resistance of Materials. (Nauka, Moscow, 1986) [in Russian].
16. S. Pandini and A. Pegoretti, XPRESS Polymer Letters **5** (8), 685 (2011).
17. L. N. Pal-Val et al., Condensed Matter and Interphase Boundaries **10** (3), 226 (2008).
18. C. R. Calladine, Theory of Shells Structures. (Cambridge Univ. Press, 1983).
19. J. S. Bono et al., Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A **902**, 95 (2018).
20. H. Oh. Seog and Chiho Wang. Mu2e Straw Creep Measurements, Technical Note, (DUKHEP-2015-09-14).