

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТРОУ-ДЕТЕКТОРОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ СОМЕТ

*Б. Сабиров^{а,1}, Г. Адамов^{а,б}, И. Глебов^в, Т. Еник^а, Е. Канева^а,
А. Моисеенко^а, Е. Романов^в, Н. Рыбаков^а, А. Фёдоров^а,
З. Цамалаидзе^{а,б}, Н. Цверава^{а,б}*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Грузинский технический университет, Тбилиси

^в ООО «ГИРО-Пром», Дубна, Россия

Статья посвящена созданию экспериментальной установки SRP-Straw для изготовления уникальных строу-детекторов для совместного ОИЯИ–КЕК эксперимента СОМЕТ. Способ сварки строу ультразвуком значительно упрощает технологию их изготовления по сравнению со строу двойной намотки, изготовленными методом спиральной намотки и склейки двух слоев майлара. Уменьшается количество вещества, что важно для минимизации многократного рассеяния. Уменьшению многократных рассеяний способствует также снижение уровня газовой течи из трубок. Измеренные параметры трубок показали высокое качество их производства и надежность.

The article is devoted to the creation of an experimental setup SRP-Straw for the manufacture of unique straw detectors for the joint JINR–KEK experiment COMET. The method of welding straw ultrasound greatly simplifies the technology of their manufacture compared to twisted tubes made by spiral winding and gluing two layers of mylar. The amount of matter decreases, which is important to minimize multiple scattering. The reduction of multiple scattering is also facilitated by a decrease in the level of gas leakage from the tubes. The measured parameters of the tubes showed the high quality of their production and reliability.

PACS: 29.40.–n

ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент СОМЕТ предназначен для поиска процесса, связанного с нарушением лептонного числа, — безнейтринной конверсии мюона в электрон. Эксперимент предполагается реализовать на исследовательском комплексе протонного ускорителя J-PARC в Японии. Цель эксперимента — зафиксировать электроны, вылетающие в процессе $\mu-N \rightarrow e-N$ с энергией 105 МэВ/с, с точностью лучше 2% [1, 2]. Для решения этой амбициозной задачи разрабатывается комплекс аппаратуры с высоким разрешением, чувствительностью и эффективностью. Главным элементом детекторной системы является трекер на основе сверхтонких строу-трубок. Основные требования,

¹E-mail: sabirov@jinr.ru

предъявляемые к строу: 1) высокое пространственное разрешение меньше 150 мкм; 2) высокая эффективность регистрации электронов с энергией 105 МэВ; 3) работа в вакууме и магнитном поле 0,8–1,1 Тл; 4) импульсное разрешение меньше 200 кэВ/с.

На основе опыта, приобретенного нашей группой в производстве строу-трубок диаметром 10 мм на площадке ЛФВЭ, группа ЛЯП разработала и создала установку СРП-Straw для изготовления строу-трубок со сверхтонкими стенками 12 мкм и диаметром 5 мм. Толщина стенок 12 мкм обеспечит существенное уменьшение многократных рассеяний, а уменьшение диаметра трубок до 5 мм улучшит загрузочные характеристики детектора и повысит точность определения координаты трека. Трубки изготавливаются методом сварки с помощью ультразвука. Производство строу осуществляется в чистой комнате с постоянным контролем температуры в пределах 22–23 °С и влажности 43–44 %.

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПОМЕЩЕНИЕ ЧИСТАЯ КОМНАТА (CLEAN ROOM)

Высокое качество строу-трубок всецело зависит от условий окружающей среды, в которой они изготавливаются. Производственное помещение состоит из трех комнат (см. рис. 1).

а) Рабочее помещение, где расположено основное устройство СРП-Straw, предназначенное для изготовления строу-трубок, снабженное системой автоматического контроля процесса производства, а также приборы контроля качества сварки трубок и соответствия параметров трубок требованиям спецификации.

б) Комната со стеллажами для хранения изготовленных трубок, где проходит испытание трубок на качество сварки методом подачи в них газа Ag под давлением 2–3 атм. Их хранение осуществляется в течение длительного времени — от 6 до 12 мес.

в) Шлюзовая комната, где производится смена обуви и верхней одежды.

Первые два помещения (а и б) находятся под постоянным небольшим избыточным давлением воздуха, который подается из вентиляционной системы и проходит через систему фильтров HEPA. Чистота воздуха обеспечивается на уровне 6-го класса чистоты (ГОСТ ИСО 14644) — 35 000 частиц размером 0,5 мкм на 1 м³ воздуха.

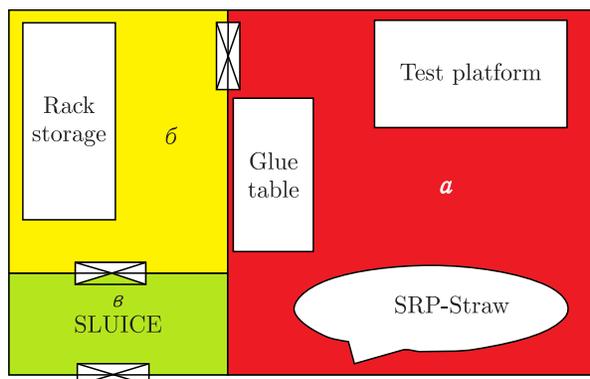


Рис. 1. План чистой комнаты

Температура стабилизируется с точностью $(23,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$. Влажность поддерживается в пределах $(43 \pm 3)\%$.

Описание конструкции. Оборудование представляет собой конструкцию, состоящую из нескольких составных частей.

Для обеспечения требуемой точности и стабильности работы установки была собрана конструкция на жестком основании из профилей BoshRexroth (рис. 2), обеспечивающих достаточную жесткость с коэффициентом $k = 2\,500\,000\text{ Н/м}$ и точность не хуже $0,1\text{ мм}$, а также легкость сборки.

На основание крепятся подвижные платформы (рис. 3), изготовленные в опытно-экспериментальных мастерских Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Подвижные платформы представляют собой систему из кареток и направляющих, базирующихся на металлических площадках.

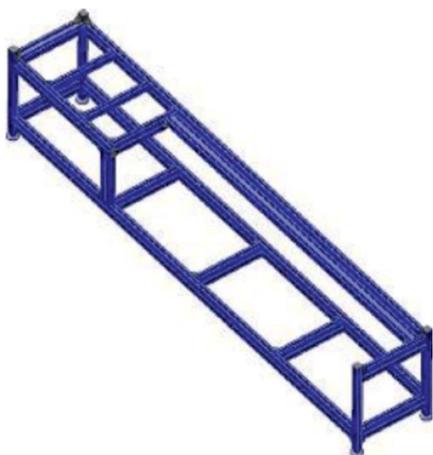


Рис. 2. Основание из профилей Bosh-Rexroth

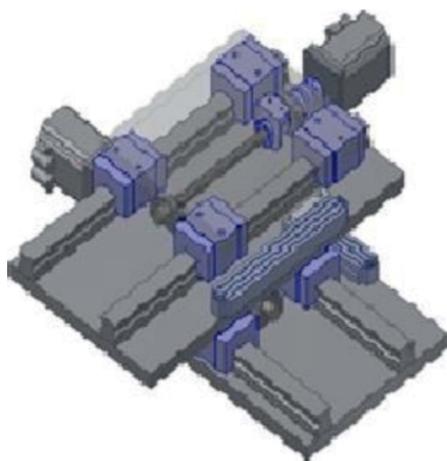


Рис. 3. Подвижные платформы

На вертикальную платформу жестко крепится ультразвуковая головка (рис. 4), работающая как молоточек с частотой 44 кГц (полное описание см. ниже). Передвижение головки обеспечивается асинхронными двигателями со встроенными энкодерами; с установкой на платформах дополнительных линейных абсолютных энкодеров с точностью делений 1 мкм обеспечивается точность позиционирования платформы в пределах 3 мкм (рис. 5). По результатам тестовых прогонов дополнительные измерения не потребовались.

Управление установкой и ее настройка обеспечиваются выносным сенсорным монитором и стандартной клавиатурой (рис. 6).

Для визуализации процесса сварки установлен электронный микроскоп с выводом картинки на дополнительный монитор (рис. 7). Подгонка положения кольца для формирования трубки из ленты осуществляется микрометрическими винтами с точностью позиционирования 10 мкм .

Катушка с майларом устанавливается на ось, снабженную регулируемым тормозом для обеспечения необходимого натяжения ленты силой 250 г , измеренной с помощью динамометра.



Рис. 4. Ультразвуковая головка в сборе



Рис. 5. Подвижные платформы для выставления положения головки относительно места сварки трубки



Рис. 6. Выносной сенсорный монитор



Рис. 7. Электронный микроскоп в рабочем положении

Управление установкой выполнено на основе промышленного контроллера UMAC DeltaTau и системы цифрового программного управления «Катунь». Серводвигатели управляются ПИД-регулятором и имеют двойную обратную связь: инкрементальные энкодеры на двигателях и абсолютные особо точные линейки вдоль оси передвижения. Система управления обеспечивает точность и простоту управления, удобство использования установки.

ПРОИЗВОДСТВО СТРОУ-ТРУБОК

Разработка новых тонкостенных строу-трубок является уникальным и инновационным процессом. Специально для эксперимента СОМЕТ для фазы 1 были изготовлены и протестированы 2700 строу с толщиной стенок 20 мкм и диаметром 10 мм [7]. Все трубки изготовлены в соответствии с высокими требованиями, которые предъявляются к трекковым системам в этом эксперименте.

Одним из основных требований является малое количество вещества на пути частиц. Преимущество сварных трубок с помощью ультразвуковой технологии состоит в их способности работать в вакууме, имея минимальную течь газа, и сохранять свои механические параметры в течение длительного времени. При этом данная технология на установке СРП-Straw позволяет получить строу диаметром $D = 5\text{--}10$ мм с разной толщиной стенки в диапазоне 12–20 мкм.

Существует два метода изготовления тонкостенных строу-трубок. Первый — это метод двойной намотки и второй — метод прямой сварки с помощью ультразвука (рис. 8). Конструкция с двойной намоткой состоит из двух спирально намотанных металлизированных пленок из майлара [3]. Этот метод требует использования клея между двумя слоями. Склеенная область и двухслойность из-за двойной толщины материала и более узкого диапазона области упругой деформации являются недостатками строу двойной намотки. Другой основной проблемой этих трубок является их нестабильная форма после установки в растянутом состоянии на раму в вакууме, при этом рабочее давление газа внутри трубок составляет 1 бар. Это приводит к деформации трубки и изменению зазора анод–катод во времени. Чтобы избежать всех недостатков строу-трубок двойной намотки, группой ученых, инженеров, технологов

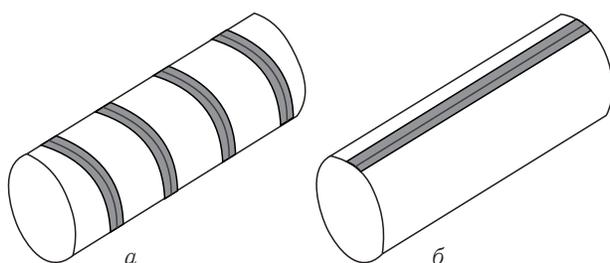


Рис. 8. Изображение трубок, изготовленных двумя методами: а) двойной намотки и б) прямой сварки ультразвуком

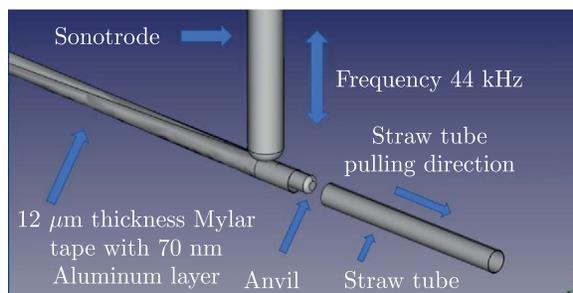


Рис. 9. Схема сваривания строу из майларовой пленки

и техников из ОИЯИ и ЦЕРН была разработана и внедрена новая технология их производства [4–7]. Для изготовления новых, улучшенных строу-трубок используется ультразвуковая сварка. Формирование трубки происходит вокруг центрального цилиндра и внутреннего отверстия охватывающего кольца при протяжке ленты.

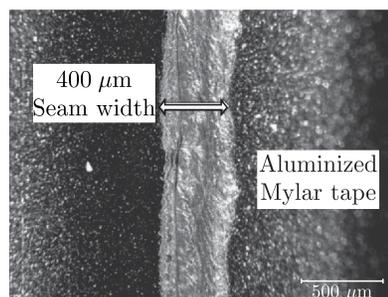


Рис. 10. Шов сваренной трубки шириной 400 мкм

Величина нахлеста определяется разницей величины ширины ленты и длины окружности отверстия в формирующем кольце, где один край пленки заворачивается, образуя нахлест, и сваривается со вторым краем по прямой линии с помощью сонотрода, без использования клея (рис. 9). Такая конструкция строу обеспечивает ее стабильную цилиндрическую форму после установки в растянутом состоянии и при избыточном давлении. При производстве строу такого типа необходимо получить узкий шов, так как именно шов является основной областью, где возможна утечка газа. Одна из причин утечки газа

через шов — это разрушение металлизированного внутреннего слоя в области сварки. Поэтому качеству сварки уделяется особое внимание (рис. 10).

Адаптированная технология ультразвуковой сварки. Технология ультразвуковой сварки адаптирована и интегрирована в устройство СРП-Straw, которое было сконструировано в Лаборатории ядерных проблем. Это устройство предназначено для изготовления строу-трубок диаметром 5 мм из металлизированной ленты толщиной 12 мкм. Для процесса сварки используется специальный ультразвуковой генератор с частотой 44 кГц. Выделяемая мощность в точке сварки 100 Вт, которой вполне достаточно для сваривания пленок толщиной 12–20 мкм. На рис. 9 показана схема сварочного процесса строу.

Надежность строу-трубки. Контроль качества и надежность имеют особое значение при массовом производстве строу. Для этого каждая трубка после изготовления проходит специальную проверку на качество. После изготовления и многократных тестов более чем 800 образцов строу-трубок с толщиной 12 мкм, диаметром 5 мм и разной длиной от 0,5–1,5 м были получены нужные параметры, используемые в процессе сварки качественных строу-трубок. В качестве пилотных образцов изготовлены и протестированы 120 трубок с толщиной стенки 12 мкм, диаметром 5 мм и длиной 0,7 м.

В результате исследований и накопленного опыта были разработаны следующие этапы контроля качества.

Контроль диаметра строу. Для контроля диаметра используется специальный стержень — калибр, проточенный с разными диаметрами: $D = 4,75, 4,8, 4,85, 4,9, 4,95$ и 5 мм (рис. 11). В дополнение к этому осуществляется мониторинг с помощью оптического сенсора.

Для контроля диаметра с каждой трубки с обеих сторон отрезаются концы. Далее с помощью калибра измеряется диаметр и записывается в базу данных. Для достоверности полученной однородности диаметра по всей длине берется каждая десятая строу, нарезается кусками по 10 см и измеряется калибром каждый образец.

Контроль качества шва. Шов — это самая важная часть строу-трубки. Прочность шва прямо связана с давлением, которое трубка может выдержать без потери

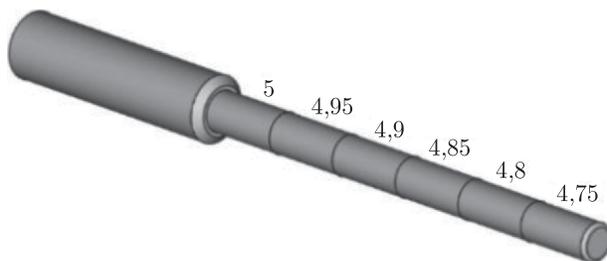


Рис. 11. Калибровочный стержень

своих рабочих параметров. Также от качества шва зависит величина газовой течи. Шов должен быть гладким и однородным в ширину по всей длине строу (см. рис. 10). После изготовления и визуального осмотра с концов строу срезается по 8 см, потом они заклеиваются, и с помощью прямой подачи газа Ag до разрыва или деформации фиксируется давление. Максимальное давление для 12-мкм строу-трубок составляет $(4,0 \pm 0,3)$ бар избыточного. При этом рабочее давление строу 1 бар, допустимое стабильное давление 2 бар, а рекомендованное для хранения 1,5 бар. Последнее используется для транспортировки и хранения с целью долговременного тестирования. Это нужно для полной уверенности в качестве и надежности. Все 120 образцов были выдержаны при избыточном давлении $dP = 2$ бар в течение более 6 мес (см. таблицу).

Течь газа. С помощью специального стенда в чистой комнате, где контролируются температура и влажность (см. выше), была измерена газовая течь из строу при избыточном давлении $P = 1,4$ бар. В стенде устанавливается строу-трубка в свобод-

Измеренные параметры трубок

Толщина майлара, мкм	Диаметр, мм	Ширина шва, мкм	Максимальное давление, бар
12	4,8	250-400	$4 \pm 0,3$

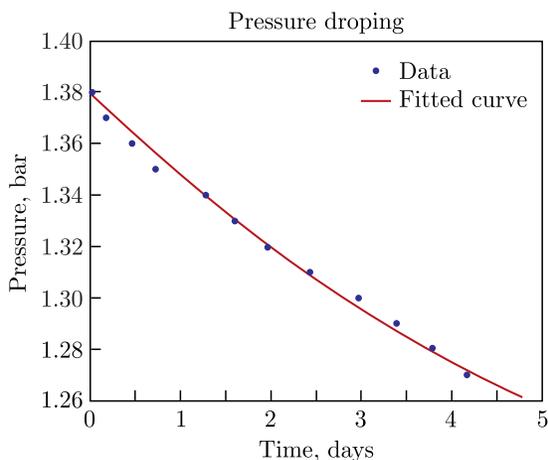


Рис. 12. Результаты измерений утечки газа из строу с толщиной стенки 12 мкм, диаметром 5 мм и длиной 60 см

ном состоянии, одним концом она присоединяется к датчику давления, а другим — к вентилю, подающему газ Ar. После подачи нужного давления вентиль закрывается, и с помощью компьютера записываются показания датчика в течение длительного времени. Для строу с толщиной стенки 12 мкм, диаметром 5 мм и длиной 0,6 м падение давления в сутки составило 25 мбар/сут, а вычисленная утечка газа составила $\sim 1,5 \cdot 10^{-4}$ см³/мин (рис. 12).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Способ сварки строу ультразвуком значительно упрощает технологию их производства по сравнению со строу двойной намотки, изготовленными методом спиральной намотки и склейки двух слоев майлара. При этом уменьшается количество вещества, что важно для минимизации многократного рассеяния. Уменьшению многократных рассеяний способствует также снижение уровня газовой течи из трубок. Измеренные параметры трубок показали высокое качество их производства и надежность.

Для изготовления серийных строу создано специализированное рабочее помещение (чистая комната) со следующими параметрами: чистота воздуха — на уровне 6-го класса чистоты, стабилизация температуры — в пределах $\pm 0,1$ °C при $T = 23$ °C, влажность поддерживается на уровне не хуже $\pm 3\%$ при влажности $H = 43\%$. Все это существенно влияет на стабильное качество производимых строу-трубок.

Автоматизированная система управления обеспечивает точность, простоту управления и удобство использования установки СРП-Straw.

Изготовленные опытные образцы строу-трубок в количестве 120 шт. со сверхтонкими стенками толщиной 12 мкм и диаметром 5 мм продемонстрировали полное соответствие требованиям эксперимента COMET.

Выражаем глубокую благодарность дирекции Лаборатории ядерных проблем за постоянный интерес к физической программе эксперимента COMET и поддержку работ по созданию установки СРП-Straw. Сердечно благодарим Грузинский национальный научный фонд им. Шота Руставели, при поддержке которого данная работа была подготовлена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *COMET Collab.* Conceptual Design Report for Experimental Search for Lepton Flavor Violating $\mu^- N \rightarrow e^- N$ Conversion at Sensitivity of 10^{-16} with a Slow-Extracted Bunched Proton Beam (COMET). J-PARC P21. KEK Report 2009-10. 2009.
2. *Mihara S., Miller J. P. et al.* Charged Lepton Flavor-Violation Experiments // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2013. V. 63. P. 531–552.
3. *Пешехонов В. Д.* Координатные детекторы на основе тонкостенных дрейфовых трубок // *ЭЧАЯ.* 2015. Т. 46, вып. 1. С. 167–218.
4. *Azorskiy N. et al.* A Drift Chamber with a New Type of Straws for Operation in Vacuum // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 824. P. 569–570.
5. *Movchan S.* Straw Tracker Prototype for the Precise Measurement of the Very Rare Decay $K^+ \rightarrow \pi + \nu\nu^-$ (NA62 Experiment at SPS CERN) // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2009. V. 604. P. 307–309.

6. *Tsverava N. et al.* Development of Ultrathin 12 μm Thick Straw Tubes for the Tracking Detector of COMET Experiment // IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conf. (NSS/MIC), Oct. 26 – Nov. 2, 2019.
7. *Nishiguchi H. et al.* Development of an Extremely Thin-Wall Straw Tracker Operational in Vacuum – The COMET Straw Tracker System // Nucl. Instr. Meth. A. 2017. V.845. P. 269–272.

Получено 16 сентября 2021 г.