ЛАБОРАТОРНАЯ

ТЕХНИКА

УДК 621.384.663

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ТРУБОК ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРА PAS

©2027 г. В. А. Андреев[a], М. И. Гасанов[b], Д. М. Гасанов[b], В. Ю. Иванов[a], А. Г. Крившич[a,*], Д. А. Майсузенко[a], В. Д. Пчелинцева[b], Л. Ш. Рабинский[a], Г. Д. Шабанов[a]

[a] *Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт" Россия, 188300, Гатчина Ленинградской обл., мкр. Орлова роща, 1*

[b] *ООО "МедСпецТруб" Россия, 195027, Санкт-Петербург, Магнитогорская ул., 23*

[*] *E-mail: krivshich_ag@pnpi.nrcki.ru*

Поступила в редакцию 21.01.2026

После доработки 30.09.2026

Принята к публикации 16.10.2026

Рассмотрены конструктивно-технологические особенности изготовления и контроля качества (выходного и входного) тонкостенных алюминиевых дрейфовых трубок, изготавливаемых для координатных плоскостей (три из четырех – Y_1, X_2 и Y_2) протонного спектрометра PAS для проекта ФАИР (Германия). Диаметр трубок составляет 10 мм, а толщина стенки не превышает 300 мкм. Контроль качества трубок осуществлялся по следующим параметрам: составу материала, качеству внутренних поверхностей, прямолинейности, соблюдению геометрических размеров, также проверялась их вакуумная герметичность.

Ключевые слова: спектрометр PAS, тонкостенная трубка, качество внутренней поверхности, точный уровень утечек

1. ВВЕДЕНИЕ

Трековые детекторы на основе дрейфовых трубок нашли широкое применение в методике ядерно-физического эксперимента [1–4]. Они отличаются малым количеством вещества, высоким пространственным разрешением и надежностью в работе. Однако трубки, изготовленные из тонкого пластика, имеют свои проблемы и поэтому реально их стараются выполнить из тонкого алюминия. Но в России (а также и в Европе) алюминиевые трубки, обладающие одновременно тремя параметрами: длиной (до 3000мм), тонкими стенками (250–

300мкм), хорошей внутренней поверхностью и высокой вакуумной плотностью, не производятся.

В рамках участия ПИЯФ в проекте ФАИР в Германии на базе ОТД ОФВЭ создается протонный спектрометр PAS для эксперимента R3B. Спектрометр должен состоять из четырех детектирующих плоскостей (ДП), каждая из которых собрана на базе цилиндрических дрейфовых трубок (ДТ). Каждая ДТ имеет внутри натянутую тонкую анодную проволочку. Все основные параметры этих трубок приведены в табл.1. Параметры выбраны таким образом, чтобы ДТ имели мало вещества, работали в вакууме и имели пространственное разрешение по протонам с энергией 500–1000 МэВ лучше 200 мкм.

Таблица 1. Основные параметры детектирующих плоскостей

Название ДП	X_1	Y_1	X_2	Y_2
Апертура координатной станции, мм^2	1740×1000	1990×1000	2140×1000	2180×1000
Материал трубок	Каптон или майлар	Сплав алюминия	Сплав алюминия	Сплав алюминия
Толщина стенки трубок, мкм	70	300	300	300
Количество трубок, шт.	612	310	760	310
Количество слоев трубок, шт.	3	3	3	3
Газовый объем, см^3	50 280	62 643	62 054	62 054
Общий газовый объем, см^3	≈ 238 000			

Все ДТ спектрометра располагались в плоскостях X_1 и X_2 вертикально, а в плоскостях Y_1 и Y_2 горизонтально.

Первая детектирующая плоскость на пути пучка (X_1) должна иметь минимальное поглощение для регистрируемых частиц, поэтому она будет изготавливаться из тонкостенных трубок из алюминизированного каптона (или майлара) с толщиной стенки не более 70 мкм. Требования минимизации количества вещества (прозрачности) плоскостей Y_1, X_2 и Y_2 менее строгие, поэтому они будут собираться на базе алюминиевых трубок с толщиной стенки не более 300 мкм.

Рис. 1. Схема расположения детектирующих плоскостей ….

Расположение сборки из ДП внутри вакуумной камеры схематично показано на рис. 1. Каждая ДП будет заключена в собственную несущую раму. Все четыре плоскости должны располагаться на общей механической конструкции на заданном расстоянии друг от друга. Рамы каждой ДП будут изготовлены из алюминиевого профиля (рис. 2). На этих же рамах размещены система газообеспечения и придетекторная электроника каждой ДП.

Рис. 2. Алюминиевый профиль для несущих рам.

Спектрометр будет эксплуатироваться в вакууме при давлении $P \approx 1 \cdot 10^{-5}$ атм. Работа всего спектрометра в вакууме требует, чтобы давление газовой смеси в нем превышало P=1атм, а вот степень превышения сильно зависит от механических характеристик плоскостей спектрометра, которые очень разные.

В первую очередь это относится к плоскости из мягких каптоновых трубок X_1. Поэтому нужно механически “развязать” наружную раму с самой этой плоскостью, которая в этом случае становится самоподдерживающей. Если удастся реализовать такую ситуацию, то можно не предъявлять специальных требований к механической прочности индивидуальной рамы для детектирующей плоскости X_1 спектрометра.

Каждая плоскость будет состоять из трех слоев трубок. Слои сдвинуты относительно друг друга на один радиус трубки. При такой компоновке частица, попавшая в “мертвую” зону между трубками в первом слое, все равно будет зарегистрирована в последующих слоях с необходимой пространственной точностью. ДТ объединяются в плоскости путем их склеивания друг с другом в нескольких точках по длине.

Для изготовления детектирующих плоскостей X_2, Y_1 и Y_2 необходимы трубки из сплава алюминия АМг5 (или АМг6) с диаметром 10 мм и толщиной стенки не более 0.30 мм. Однако в соответствии с ГОСТ 18475-82 минимальная толщина стенки труб диаметром 6–20 мм составляет 0.5 мм. Такое противоречие существенно, и надо найти технологию для преодоления этого.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ОСОБО ТОНКОСТЕННЫМ ТРУБКАМ

Геометрические требования к трубкам с нашей стороны были жесткими, и они представлены в табл. 2.

Таблица 2. Спецификация на трубки

Диаметр внутренний, мм	Стенка трубки, мм	Диаметр наружный, мм	Длина трубки, мм	Кол-во, шт.	Общая длина, м
9.50–9.70	0.22–0.24	9.94–10.18	1200	1000	1200
			2200	400	880
			2400	400	960

Поскольку дрейфовая трубка будет работать в условиях вакуума, мы требуем, чтобы предельное давление, при котором каждая трубка проверяется на утечки, составило P = 5 атм (это абсолютное давление). При этом давление утечки газа не должно превышать ΔP=0.001 атм за 10 минут в трубке длиной L=100 см.

Качество внутренней поверхности трубок чрезвычайно важно для уверенной работы ДТ спектрометра, поэтому оно проверялось различными методами. При этом изучалась как ее структура, так и шероховатость (последняя должна быть не хуже 9-го класса). Проверялся также элементный состав материала трубок.

Единственным производителем особо тонкостенных трубок (диаметр 10мм с толщиной стенки менее 0.5 мм) в СССР был "Южмаш". Это ракетно-космическое объединение, которое осталось на Украине, и в настоящее время недоступно. В Европе подобное производство есть в Швейцарии и в Германии, но толщина стенок трубок у них больше (не менее 400 мкм). В России подобных производств нет.

В течение трех лет ПИЯФ вкладывал средства в отладку технологии производства тонкостенных трубок в ООО “МедСпецТруб”. В настоящее время в ООО “МедСпецТруб” технология изготовления трубок из алюминия АМг5 отработана. Важно, что достигнутая толщина стенок составила 220–240мкм, что почти в 2 раза лучше, чем в Европе. Это существенно с точки зрения уменьшения количества вещества. Поэтому далее в статье технологические особенности производства особо тонкостенных трубок будут рассмотрены более подробно.

3. ПРОИЗВОДСТВО И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРУБОК

В производстве особо тонкостенных трубок главную роль играет пунктуальное соблюдение протокола найденных технологических решений. В ООО “МедСпецТруб” было изготовлено из алюминиевого сплава АМг5 чуть более 3000 м трубок с размерами, указанными в табл. 2. Трубки изготавливают из алюминиевого сплава, производство запускается только при наличии сертификата.

В ООО “МедСпецТруб” каждая трубка проходит через систему выходного контроля, где она нумеруется и сопровождается своим паспортом установленной формы. Трубки группируются в партии по 100 штук. Каждая партия трубок сопровождается сертификатом на состав материала и фотографиями внутренней поверхности трубок, выполненными на электронном микроскопе. Поступление в ПИЯФ очередной партии трубок показано на рис.3.

Рис. 3. Распаковка трубок. Начало в ПИЯФ входного контроля качества.

При закупке новой партии заготовок, либо при любом изменении технологии производства производитель предоставляет заказчику на согласование состав материала заготовок, полученный у лицензированной организации.

Технология проведения выходного и входного контроля качества тонкостенных трубок, выпускаемых поставщиком для НИЦ КИ ПИЯФ, предусматривает заполнение паспортов

выходного (на фирме-изготовителе) и входного контроля качества (в ОТД ПИЯФ). На каждую трубку заполняется отдельный паспорт. Этот паспорт сопровождает каждую трубку на всем ее технологическом пути вплоть до установки в рабочее изделие.

При производстве трубок используются смазки, содержащие масла. Наличие малейших следов масел на внутренних поверхностях детектора недопустимо, так как детектор становится неработоспособным.

Поэтому в ПИЯФ был организован участок дополнительной промывки трубок. Этот участок функционировал на базе дистиллятора ДЭ-50 с накопителем дистиллированной воды С-300 и парогенератора. Промывка трубок проводилась всегда перед проведением входного контроля трубок в ПИЯФ. Количество выявленных бракованных трубок показано в табл. 3.

Таблица 3. Количество выявленных бракованных трубок

Длина	Негерметичные	С неотмываемым черным налетом на внутренней поверхности	Не прямолинейные
1200	33	1	1
2200	23	0	0
2400	7	2	13
Итого	63 (3.5%)	3 (0.15%)	0.78%)

Безвозвратно забраковано всего 80 трубок – 4.44%. Все эти трубки были заменены фирмой-поставщиком на годные. Общее количество трубок составляло 1800 штук.

Распределения значений толщины стенок и наружных диаметров выданных на сборку трубок представлены на рис. 4. На этих гистограммах видно, что трубки имели стенки с толщиной 235±5мкм, а их наружный диаметр изменялся на 30 мкм и составлял 10.045±0.015 мм. Это уверенно отвечает техническому заданию для параметров трубок.

Рис.4. Распределение значений толщины стенок трубок (слева) и их диаметров

4. ПРОВЕРКА КАЧЕСТВА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОК

4.1. Цвет поверхности трубки и наличие дефектов

На внутренней поверхности некоторых трубок было выявлено наличие интерференция света. В ходе исследования были выявлены вариации белого цвета. Обнаруженная палитра отличалась исключительным многообразием оттенков: от порошкообразного и искрящегося до полупрозрачного (свойственного тающему снегу). Более того, в 155 трубках (из примерно 2000 штук) цвет внутренней поверхности трубок изменялся от фиолетового до близкого к розовому. Периодичность нарастания и убывания интенсивности цвета по длине трубки позволила предположить, что это явление вызвано интерференцией света. Проведенный

анализ показал, что интерференция видимого света в трубках возможна. Качественно это можно оценить так.

Естественная оксидная пленка алюминия имеет толщину 0.1 мкм, что недостаточно для возникновения видимой интерференции. Но на сплавах Al-Mg, которые используют при изготовлении трубок, толщина оксидной пленки может достигать 2–3 мкм, и тогда возникает явление интерференции. В результате мы можем дать верхнюю оценку величины шероховатости трубок: Ra 0,32 (т.е. не хуже 0.32 мкм).

Далее, для 155 трубок длина волны наблюдаемого цвета составляет около 0.40 мкм (фиолетовый цвет) и около 0.60 мкм (розовый цвет). Мы оценили, что для наблюдения интерференции шероховатость у этих трубок должна быть менее 0.4–0.6 мкм. Была проверена шероховатость этих трубок (см. рис.5) и измерена глубина дефектов, возникающих как при прокатке, так и вследствие их наследования из исходного материала (рис.6). Измерения показали, что величина шероховатости их внутренней поверхности не превышает 0.4 мкм, что хорошо попадает в указанный выше диапазон.

Рис. 5. Определение степени шероховатости поверхности трубки

Рис. 6. Определение наличия дефектов и определение

Это подтвердило версию о характере наблюдаемого цвета. Иначе говоря, наличие интерференции света говорит о высоком качестве изготовленных трубок, и их не следует браковать по данному критерию.

Тестирование этих тонкостенных алюминиевых трубок на прототипах спектрометра протонов показало их полную пригодность к использованию в детекторе.

4.2. Проверка качества внутренней поверхности трубок методами сканирующей электронной микроскопии и рентген-флуоресцентного анализа

При разработке технологии прокатки проводились детальные исследования внутренней поверхности трубок на электронном микроскопе для визуализации дефектов и оценки морфологии поверхности. Одновременно осуществлялся элементный анализ дефектов и материала в целом. Полученные результаты сравнивались с таковыми для трубок производства Швейцарии и Германии. Вид внутренней поверхности трубок производства этих стран приведен на рис.7, 8. Линейные размеры изображений внутренних поверхностей на фотографиях на этих рисунках составляют 20 мкм в одном сантиметре. На обоих рисунках с разной степенью четкости зафиксирована зернистая структура металла с характерным размером зерна около 10–30 мкм в диаметре.

Рис. 8. Трубка производства Германия …

Рис. 7. Трубка производства Швейцария …

При отработке технологии прокатки в фирме-изготовителе практически на каждом этапе производственного процесса появлялись вопросы, связанные с качеством поверхности.

Первым решался вопрос, связанный с процессом отмывки поверхности на разных стадиях производства. Для примера, на рис. 9а, б приведен пример вида загрязнения необычной формы. Элементный анализ данного загрязнения показал, что это, скорее всего, остатки моющего раствора, который при сушке из-за термического расширения вышел из поры (пор) на поверхность.

Рис. 9. Поверхность с остатками моющего средства …

Спектральные линии приведены на рис. 9в, а массовое содержание элементов дано в табл. 4. Остатки моющих средств впоследствии устранились при оптимизации технологии промывки трубок.

Таблица 4. Массовое содержание элементов в загрязнении моющим средством

Элемент	Условная концентрация	Массовая концентрация.	Название эталона
O	11.08	25.03%	SiO2
F	1.71	2.18 %	CaF2
Na	0.72	0.87%	Albite
Mg	2.72	3.66%	MgO
Al	8.62	10.78%	Al2O3
Si	2.93	3.78%	SiO2
P	0.91	0.77%	GaP
S	10.45	11.89%	FeS2
Cl	13.84	17.19%	NaCl
K	15.02	17.48%	KBr
Ca	0.49	0.60%	Wollastonite
Fe	3.83	4.88%	Fe
Zn	0.68	0.88%	Zn
Сумма:		100.00%	

Кроме загрязнений от моющих средств, в поверхностном слое были обнаружены включения (рис. 10а). Были измерены их спектрограммы (рис. 10б, в). Элементный анализ показал, что это окись алюминия, окись кремния и элементы Fe и Cu (частицы), которые явно не являются моющим средством, но также привнесены извне.

Рис. 10. **а** – Включения (тип 1) и поверхностные загрязнения (тип 2)

Таблица 5. Элементный состав загрязнения типа 1

Элемент	Условная концентрация	Массовая концентрация	Сигма (массовая)
O	5.10%	6.46%	0.13%
Al	6.86%	19.10%	0.17%
Ni	10.86%	13.82%	0.19%
Cu	35.02%	48.50%	0.28%
Zn	8.61%	12.12%	0.25%
Сумма:		100.00%	

Таблица 6. Элементный состав загрязнения типа 2

Элемент	Условная концентрация	Массовая концентрация	Сигма (массовая)
O	13.81%	9.28%	0.15%
Al	3.02%	5.37%	0.09%
Si	0.22%	0.33%	0.05%
S	0.51%	0.57%	0.05%
Ti	0.43%	0.41%	0.05%
Cr	17.57%	15.55%	0.14%
Mn	1.45%	1.46%	0.10%
Fe	57.95%	58.56%	0.23%
Ni	7.82%	8.48%	0.16%
Сумма:		100.00%	

Элементный состав загрязнений приведен в табл. 5, 6. Набор химических элементов никак не относится к материалу образца, скорее всего эти элементы входят в смазочный материал, используемый при прокатке. Подобные материалы также были убраны при оптимизации технологии промывки трубок.

После гарантированного устранения из технологии всех причин, вызывающих загрязнения, были получены фазовые изображения различных химических элементов поверхности образца трубки для определения равномерности их распределения по поверхности (рис. 11), снова измерены микрошероховатости различных участков трубок и получены подтверждения, что материал трубки АМг5 (рис.12). Элементный состав поверхности трубок приведен в табл. 7.

Рис. 11. Типичные фазовые изображения распределения различных химических элементов по поверхности трубки...

Рис. 12. Спектрограмма поверхности трубок.

Таблица 7. Элементный состав поверхности трубок

Элемент	Условная концентрация	Массовая концентрация
O	0.76	1.12%
Mg	7.17	5.03%
Al	111.65	92.96%
Ti	0.08	0.10%
Mn	0.36	0.44%
Fe	0.29	0.35%
Сумма:		100.00%

При дальнейшей отработке технологии прокатки, включающей как собственно трехступенчатую прокатку, так и промежуточную термообработку с предварительной чисткой спиртом, четыре гальванических обработки, ультразвук и обработку паром, удалось получить чистоту и структуру внутренней поверхности трубок, представленные на рис.13. Видно, что у наших трубок внутренняя поверхность значительно лучше, чем поверхность трубок из Швейцарии и Германии.

Рис. 13. Качество внутренней поверхности трубок …

5. ПРОВЕРКА ТРУБОК НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

Это самая трудоемкая операция при выходном (на фирме-производителе) и входном (в ПИЯФ) контролях. Утечка – это отверстие (или отверстия) в трубке, через которое газы могут выходить наружу. Интенсивность утечки из трубки показывает величину расхода газа, который выходит наружу через стенки трубки. Важно отметить, что интенсивность утечки зависит также от типа газа.

Определим чувствительность методов измерения утечек, исходя из двух обстоятельств:

– фирма-изготовитель трубок должна оперативно находить факт утечки и реагировать на него на месте. Иначе говоря, изготовитель должен иметь достаточно чувствительный и одновременно оперативный приборный контроль за давлением газа (P) внутри трубки;

– заказчик должен иметь другую более чувствительную методику измерения, так как он должен не только находить утечку, но и определять ее местоположение. Поэтому он должен визуально контролировать место и объем утекающего газа, вышедшего за пределы трубки.

5.1. Приборный контроль давления газа в трубке

Утечка воздуха при заданном объеме V составит

$$qL = V\Delta P/\Delta t. \quad (1)$$

Отсюда можно посчитать величину утечки в трубке, которая возникает при минимальном наблюдаемом изменении давления. Если одно деление прибора составляет

ΔP=0.001 атм=0.980665 мбар, то величина утечки для трубки объемом V=200 см×1 см^2= 200 см^3= 0.2 л за время Δt=10 мин=600 с составит

$$qL=0.2\bullet 0.980665/600\approx 3.2\bullet 10^{-4}\text{л}\bullet\text{мбар/с}.$$

Из инструкции по эксплуатации гелиевых течеискателей мы знаем, что подобная утечка возникает через отверстие диаметром около 1мкм и по эмпирической классификации такая трубка имеет утечку. Отсюда ясно, что такая утечка газа характеризует предельную чувствительность приборного метода.

5.2. Визуальный контроль объема пузырьков газа

Теперь рассчитаем величину утечки, исходя из визуального контроля выходящего газа, расширяющегося до давления окружающей среды, сопровождающейся появлением пузырька воздуха объемом V_1 в воде при изменении давления на 0.001атм.

Масса газа внутри трубки объемом V при давлении P и при удельном весе газа ρ вычисляется следующим образом:

$$m = \rho PV, \qquad (2)$$

Исходя из того, что объем трубки V постоянный, находим из формулы (2)

$$\Delta m/m=\Delta P/P.$$

Тогда масса воздуха в трубке при давлении P=5атм вычисляется так:

$$m = 1.128\ \text{кг/м}^3\bullet 5\bullet 0.2\bullet 10^{-3}\text{м}^3 = 1.13\ \text{г}.$$

Если $\Delta P/P$=0.001 атм/5 ат=2•10^{-4}, тогда Δm=2•10^{-4}•m= 2.26•10^{-4} г.

Далее, надо ответить на следующий вопрос: какой объем займет газ, который имеет массу m=2.26•10^{-4} г, если он выйдет наружу в воду, и его давление составит величину P_1=1 атм?

Отсюда ясно, что при давлении в трубке P=5 атм и цене деления датчика давления 0.001 атм, мы будем наблюдать изменение этого давления на 0.001 атм только тогда, когда общий объем пузырьков составит V=250 мм^3 за время 10 мин. Диаметр одного пузырька при этом составит чуть меньше 8 мм, что легко наблюдается визуально. Могут наблюдаться несколько пузырьков, но тогда объем каждого уменьшается.

Для оценки более малых величин утечки:

– ужесточим полученный результат в 10 раз (на один порядок). Тогда получим, что за время 10 мин объем утечек составит V=25 мм^3. Диаметр пузырька при этом составит около 4 мм, что также наблюдается визуально. Этот вывод соответствует заключению, что трубка достаточно герметична;
– ужесточим полученный результат еще в 10 раз (на два порядка). Тогда получим, что за время 10 мин объем утечек составит V~3 мм^3. Диаметр такого пузырька составит

менее 1мм, что практически не наблюдается визуально. Этот вывод соответствует заключению, что подобная трубка высоко герметична.

Отсюда вытекает алгоритм измерения герметичности трубок и их отбраковки по этому параметру. Должны быть реализованы два режима измерения: при выходном контроле (грубый) и при входном контроле (точный). Схема измерений представлена на рис.14. Это позволяет отбраковывать трубки за приемлемое время измерения (10 мин).

Рис.14. Блок-схема установки по измерению утечек в трубке.

5.3. Режимы измерения

Грубый режим – это относительно большие утечки, которые регистрируются путем измерения давления с ценой деления прибора 0.001 атм. Тогда чувствительность этого метода составит – около $3.2 \cdot 10^{-4}$ л•мбар/с.

Точный режим – это малые утечки, когда датчик давления уже “не работает” из-за малости величины утечек, но пузырьки газа в жидкости, тем не менее, видны и регистрируются оператором визуально. Таким образом, этот “пузырьковый” метод точнее, предыдущего метода. Чувствительность этого метода примерно в 70 раз выше, и мы полагаем, что она находится на уровне до $5 \cdot 10^{-6}$ л•мбар/с.

Поэтому выбранный точный метод проверки – это образование пузырьков в дистиллированной воде. Глубина погружения трубки в воду равна 20 мм от верхнего края трубки. Абсолютное давление составляет 5 атм. Подаваемый газ – аргон. Мы использовали в работе этот газ по совокупности факторов: растворимость аргона в воде существенно ниже, чем растворимость воздуха, скорости звука в обоих газах очень близки, технология производства чистого аргона в промышленности отлажена и поэтому его получение дешевое, а качество гарантированное.

6. ВЫВОДЫ

В ПИЯФ разработана концепция протонного спектрометра, которая базируется на дрейфовых трубках, содержащих экстремально малое количество вещества в детектируемом объеме. Это стало возможным после создания и отладки технологии изготовления особо тонкостенных алюминиевых трубок и их серийного производства в ООО “МедСпецТруб”.

Технические параметры дрейфовых трубок:

- внутренний диаметр9.50–9.70 мм;
- толщина стенки 220–240 мкм;
- однородность внутренней поверхности Ra 0,32 (не хуже 0.32 мкм);
- элементный состав внутренней поверхности соответствуют алюминиевому сплаву АМг5.

Разработана и реализована на практике методика отбраковки трубок с очень низким уровнем утечек – менее $5 \cdot 10^{-6}$ л•мбар/с, что с запасом удовлетворяет требования эксперимента.

Полученные в России трубки по своему качеству и минимальной толщине стенок заметно превосходят трубки, выпускаемые в Европе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wintz P.* (*COSY-TOF Collaboration*). AIP Conf. Proc. 2004. V. 698. P. 789. https://doi.org/10.1063/1.1664352
2. *Bychkov V.N., Dedek N., Dünnweber W. et al.* Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A. 2006. V. 556. № 1. P. 66. https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.10.026
3. *Abat E. et al.* (*The ATLAS TRT Collab.*). J. Instrum. 2008. V. 3. P02013. P. 1. https://doi.org/10.1088/1748-0221/3/02/P02013
4. *Пешехонов В.Д.* ЭЧАЯ. 2015. Т.46. № 1. С. 167. https://elibrary.ru/item.asp?id=48560741

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема расположения детектирующих плоскостей протонного спектрометра PAS внутри вакуумного объема (вид сверху)

Рис. 2. Алюминиевый профиль для несущих рам

Рис. 3. Распаковка трубок. Начало входного контроля качества в ПИЯФ

Рис.4. Распределение толщины стенок трубок (слева) и их диаметров (справа)

Рис. 5. Трубки производства Медспецтруб: **а –** один из образцов шероховатости, **б** – определение степени шероховатости поверхности с помощью атомно-силового микроскопа в лаборатории микроанализа Санкт-Петербургского политехнического университета, величина которой на различных участках составляет 0.2–0.4 мкм, что соответствует классам 11 и 12 соответственно

Рис. 6. Определение наличия дефектов на поверхности трубки производства Медспецтруб и измерение их глубины с помощью атомно-силового микроскопа. Величина “провала” составляет не более 0.4 мкм

Рис. 7. Трубка производства Швейцарии (диаметр трубки 29 мм, толщина стенки 400 мкм). Внутренняя сторона

Рис. 8. Трубка производства Германии (диаметр трубки 14мм, толщина стенки 400мкм). Внутренняя сторона

Рис.9. Поверхность с остатками моющего средства при различном усилении (**а**, **б**). Спектрограмма элементов загрязнения (**в**)

Рис. 10. **а** – Включения (тип 1) и поверхностные загрязнения (тип 2). Их размеры составляют примерно 30×60 мкм^2. **б** – Спектрограммы элементов загрязнения (тип 1). **в** – Спектрограммы поверхностных загрязнений (тип 2)

Рис. 11. Типичные фазовые изображения распределения различных химических элементов по поверхности трубки. Масштаб везде одинаков

Рис. 12. Спектрограмма поверхности трубок

Рис. 13. Качество внутренней поверхности трубок из России после оптимизации их технологии производства и мойки. Дано при увеличении 200 (**а**), 1000 (**б**), 5000 (**в**) раз, что в масштабе соответствует 100, 10 и 2 мкм

Рис. 14. Блок-схема установки по измерению утечек в трубке: В1 – вентиль на баллоне с газом, В2 – вентиль регулировочный на редукторе, В3 – вентиль для подачи газа заданного давления в трубку, М1 – манометр высокого давления в редукторе; М2 – манометр низкого давления в редукторе, М3 – манометр

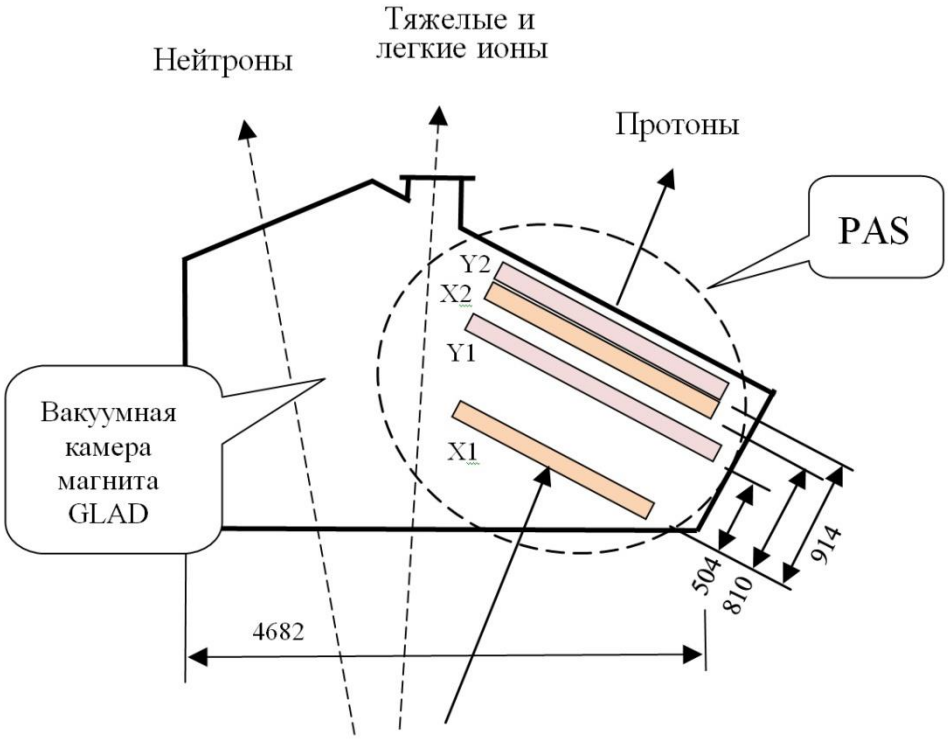

Нейтроны
Тяжелые и
легкие ионы
Протоны
PAS
Y2
X2
Y1
X1
Вакуумная
камера
магнита
GLAD
504
810
914
4682

Рис. 1.

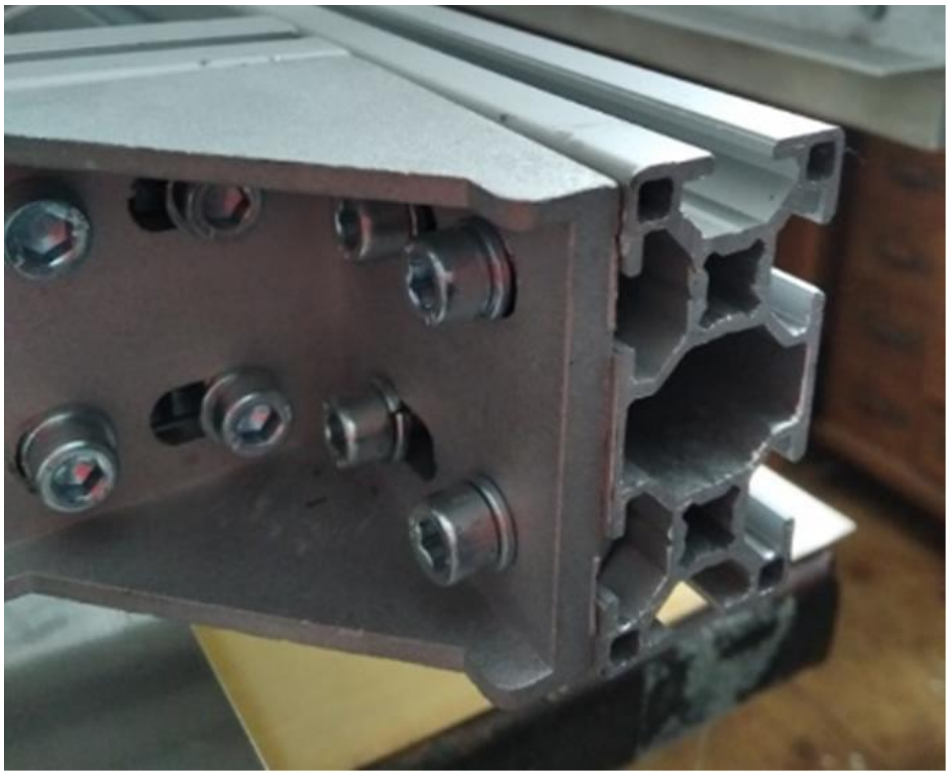


Рис. 2.



Рис. 3.

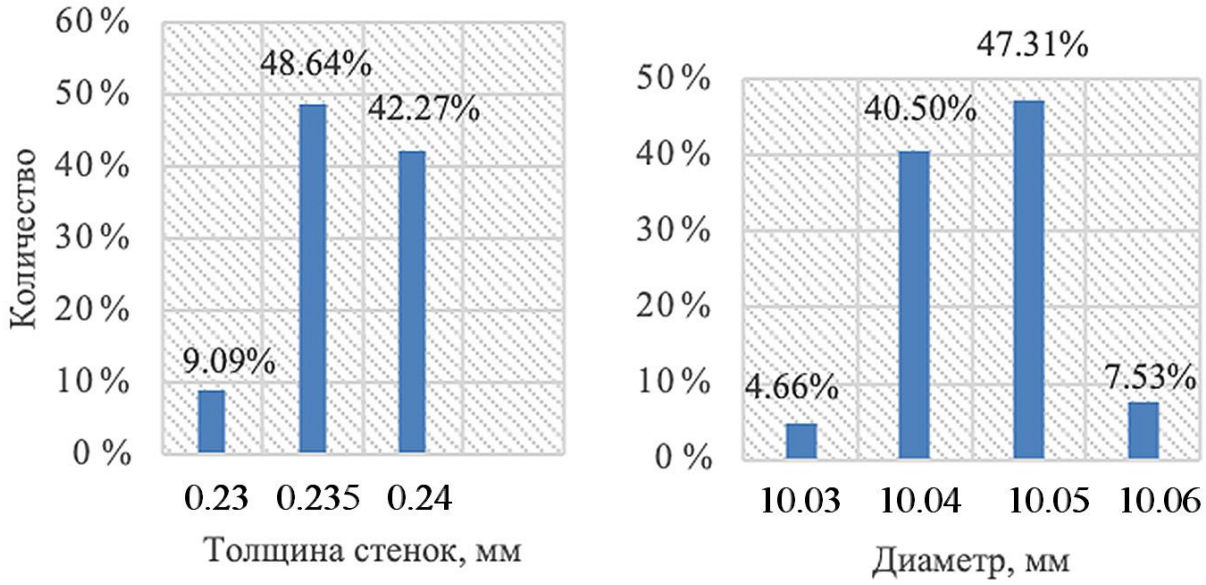

60 %
50 %
40 %
30 %
20 %
10 %
0 %
Количество
9.09%
48.64%
42.27%
0.23
0.235
0.24
Толщина стенок, мм
50 %
40 %
30 %
20 %
10 %
0 %
4.66%
40.50%
47.31%
7.53%
10.03
10.04
10.05
10.06
Диаметр, мм

Рис. 4.

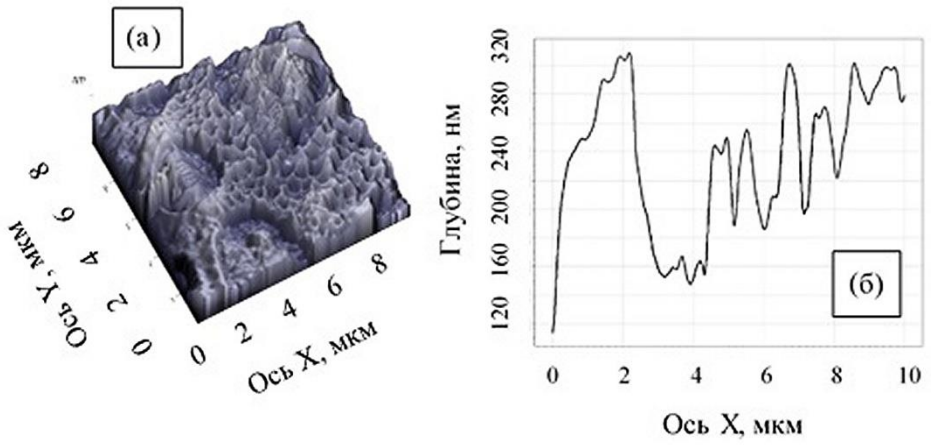

(а)
Ось Y, мкм
0
2
4
6
8
Ось X, мкм
0
2
4
6
8
Глубина, нм
120
160
200
240
280
320
(б)
0
2
4
6
8
10
Ось X, мкм

Рис. 5.

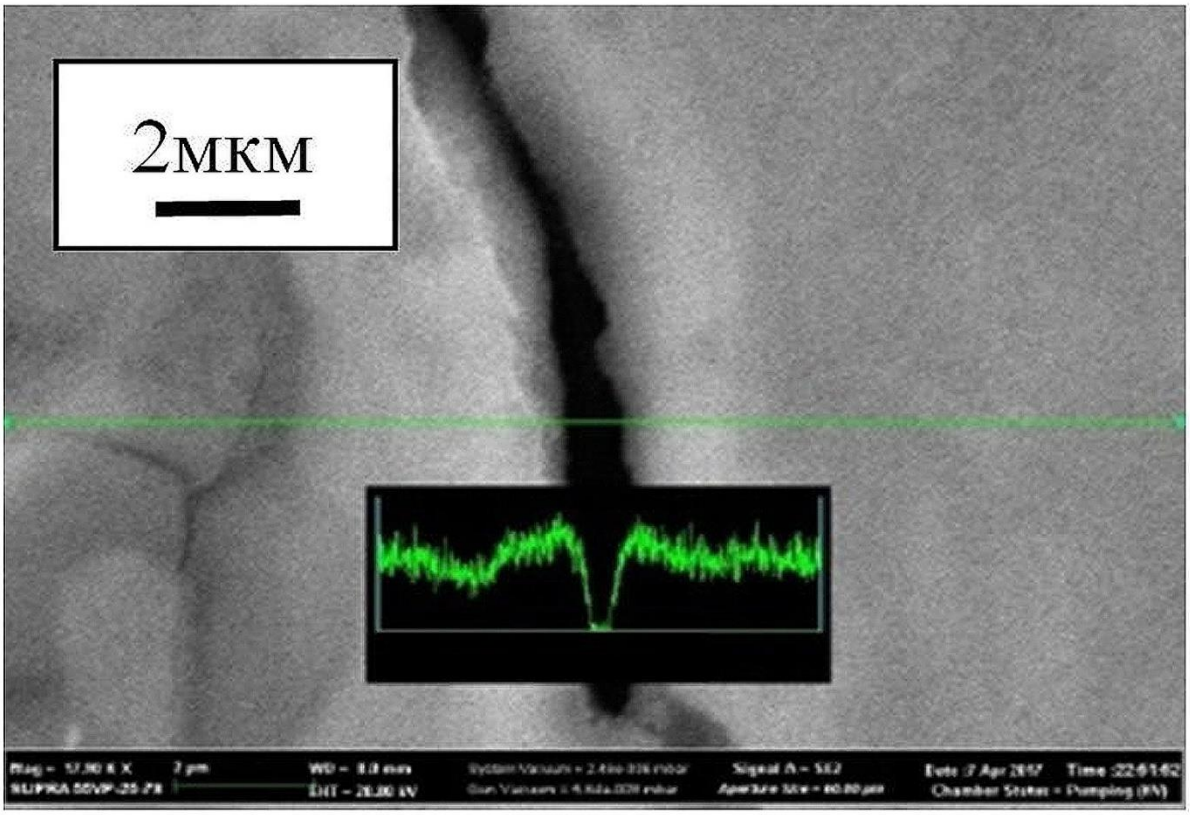


Рис. 6.

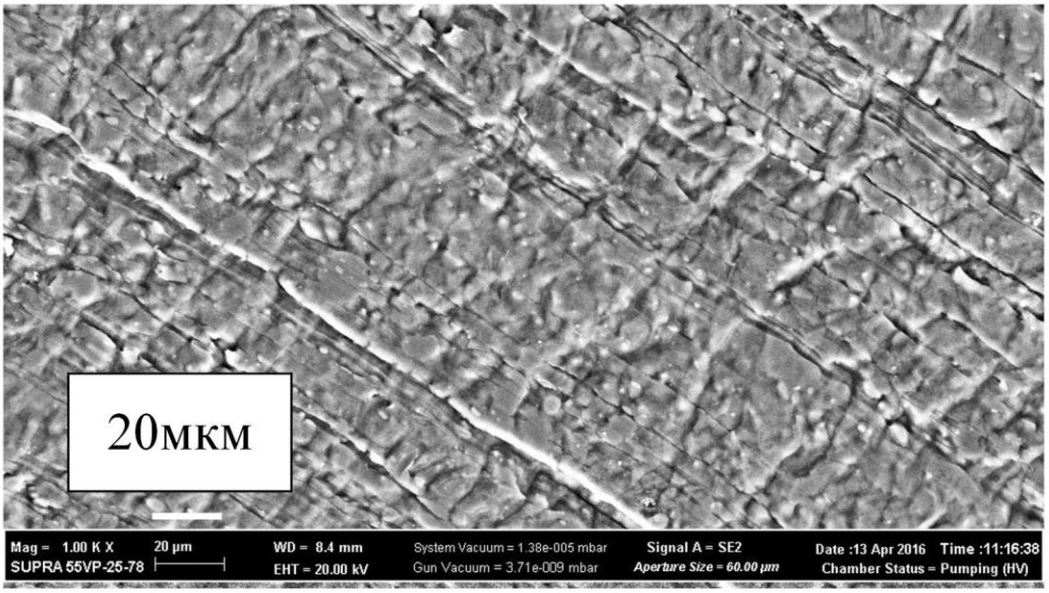

20мкм
Mag = 1.00 K X
20 µm
SUPRA 55VP-25-78
WD = 8.4 mm
EHT = 20.00 kV
System Vacuum = 1.38e-005 mbar
Gun Vacuum = 3.71e-009 mbar
Signal A = SE2
Aperture Size = 60.00 µm
Date :13 Apr 2016 Time :11:16:38
Chamber Status = Pumping (HV)

Рис. 7.

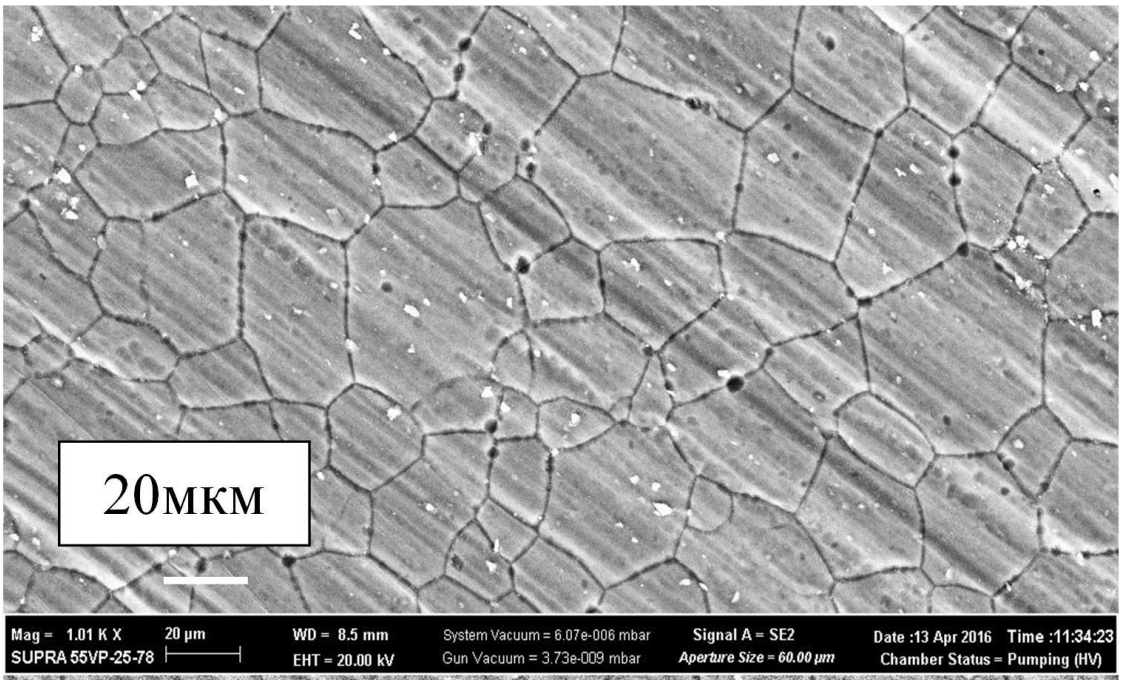

20мкм
Mag = 1.01 K X
20 µm
SUPRA 55VP-25-78
WD = 8.5 mm
EHT = 20.00 kV
System Vacuum = 6.07e-006 mbar
Gun Vacuum = 3.73e-009 mbar
Signal A = SE2
Aperture Size = 60.00 µm
Date :13 Apr 2016 Time :11:34:23
Chamber Status = Pumping (HV)

Рис. 8.

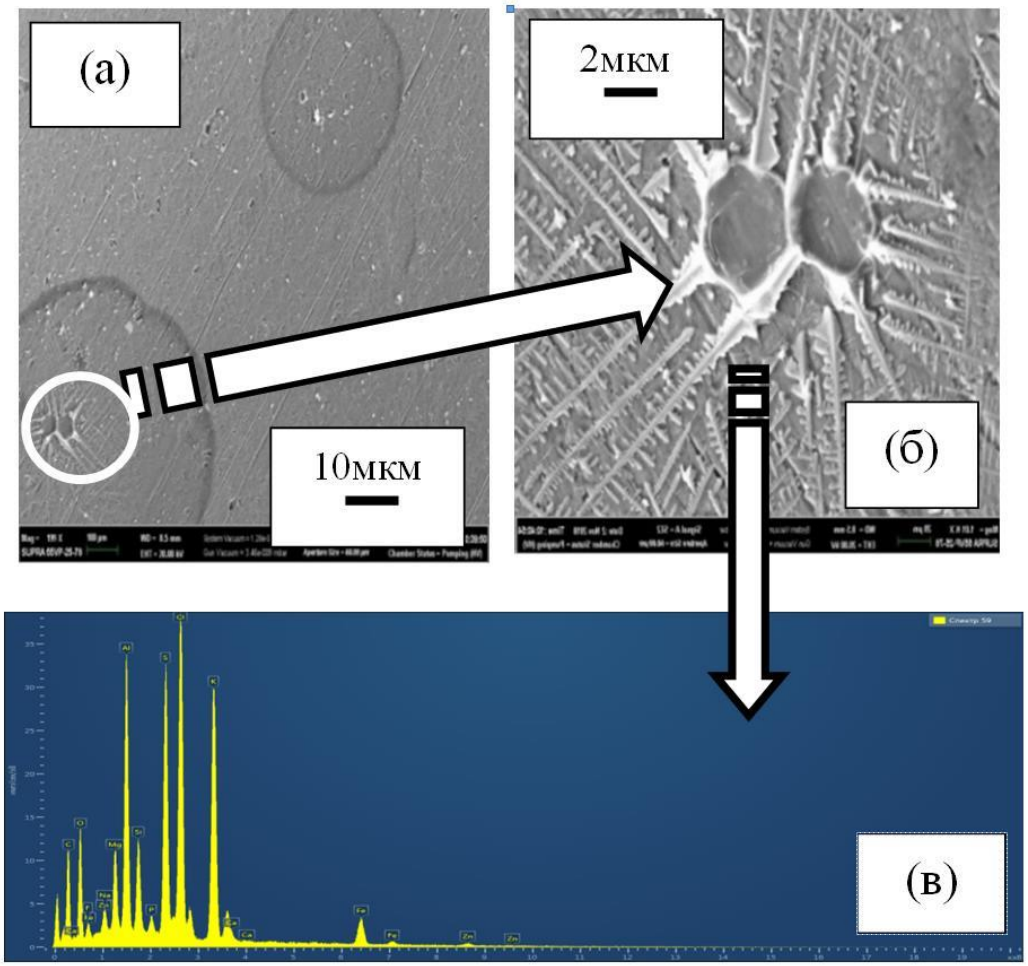


Рис. 9.

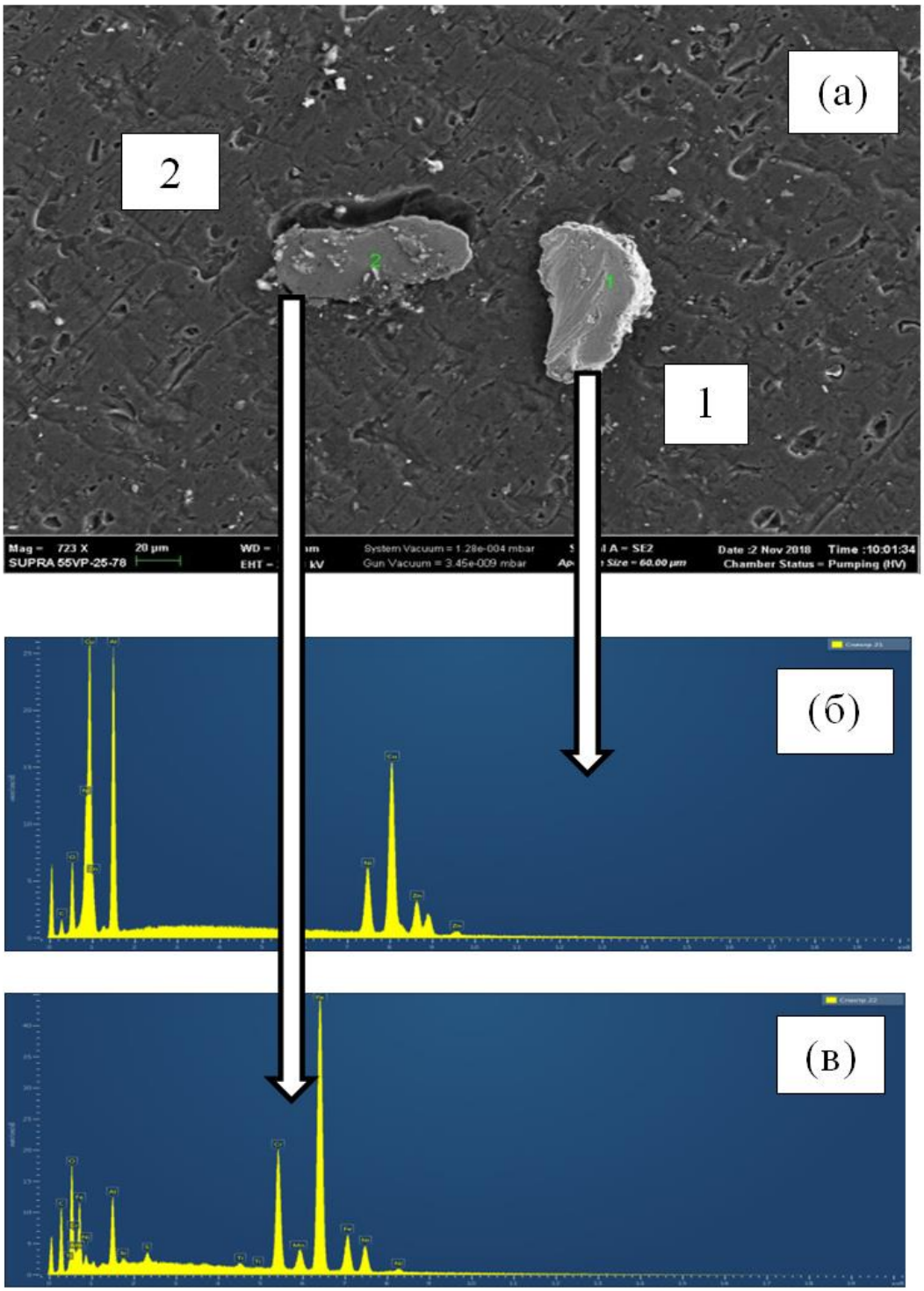

(а)
2
1
Mag = 723 X
20 µm
SUPRA 55VP-25-78
System Vacuum = 1.28e-004 mbar
Gun Vacuum = 3.45e-009 mbar
Date :2 Nov 2018
Time :10:01:34
Chamber Status = Pumping (HV)
(б)
(в)

Рис. 10.

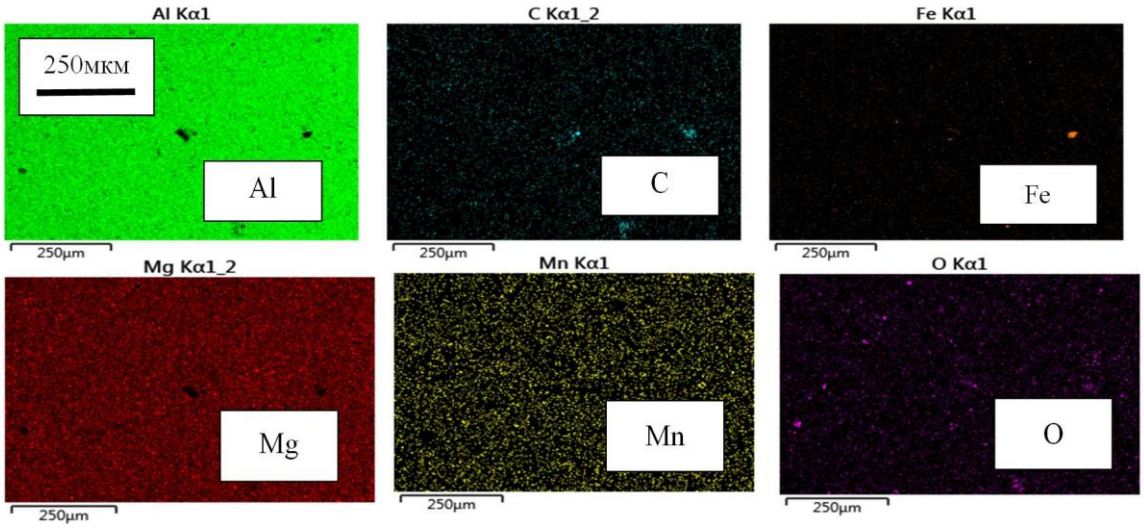

Al Kα1
250мкм
Al
250μm
C Kα1_2
C
250μm
Fe Kα1
Fe
250μm
Mg Kα1_2
Mg
250μm
Mn Kα1
Mn
250μm
O Kα1
O
250μm

Рис. 11.

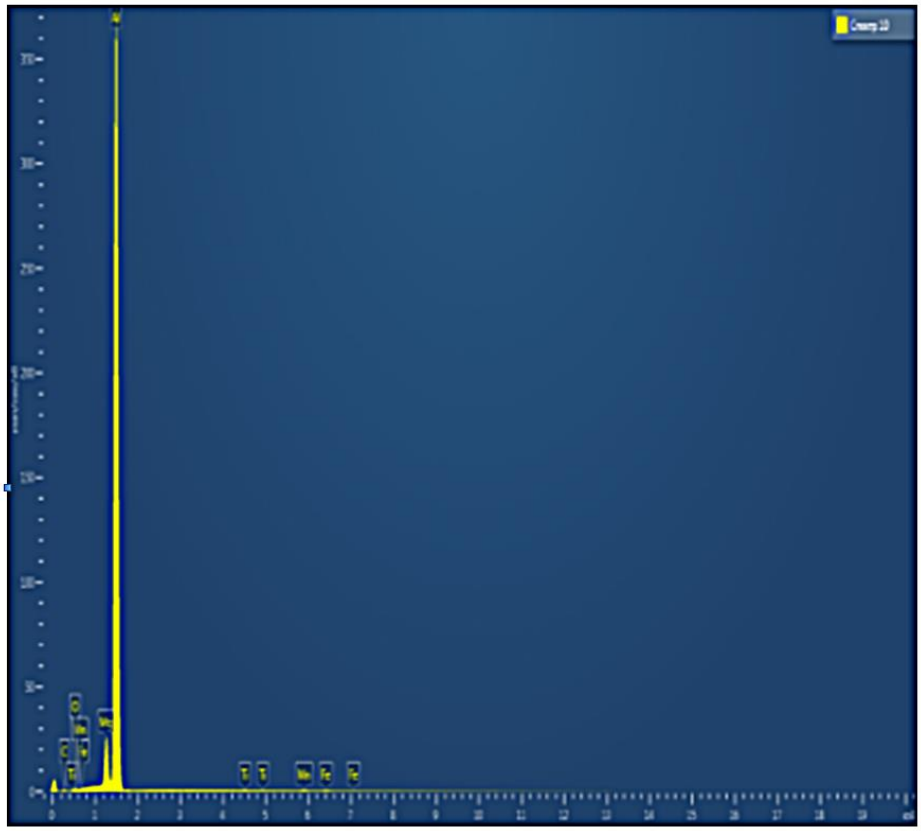


Рис. 12.

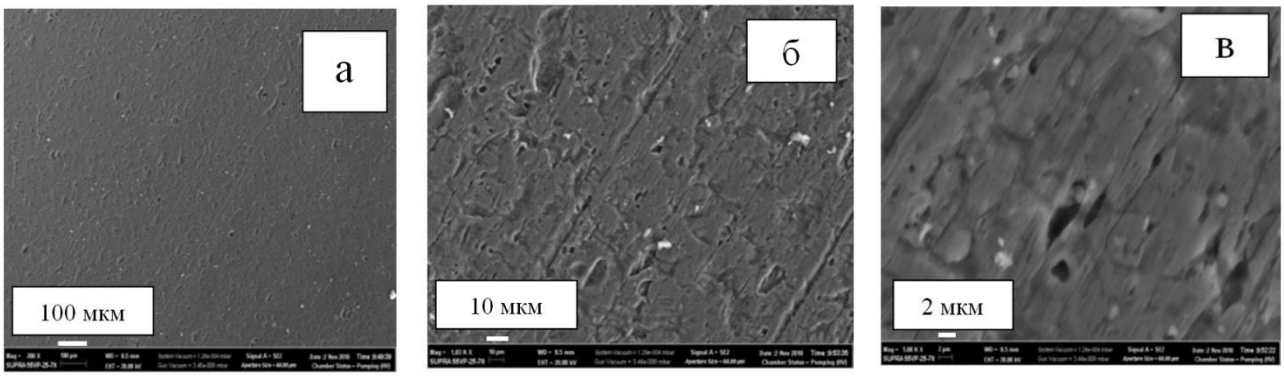


Рис. 13.

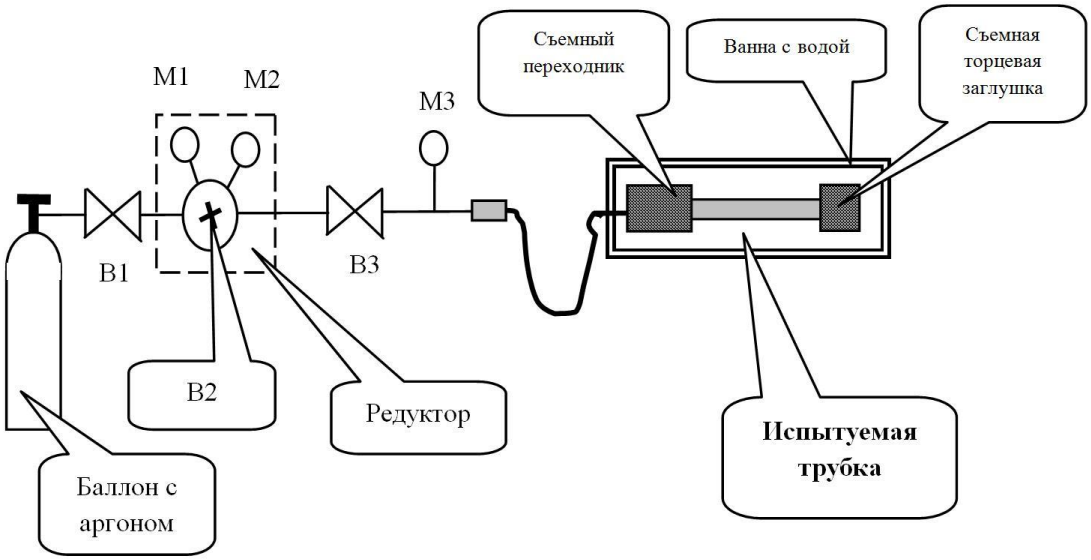

Съемный переходник
Ванна с водой
Съемная торцевая заглушка
M1
M2
M3
B1
B2
B3
Редуктор
Баллон с аргоном
Испытуемая трубка

Рис. 14.