

УДК 543.545+ 544.032.65

EDN: PRYMJX

© Ф. Л. Владимиров, А. С. Альдекеева, А. А. Фёдоров, 2026

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БУТАНОВОЙ И ВОДОРОДНОЙ ГОРЕЛОК ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ С КВАРЦЕВЫХ КАПИЛЛЯРОВ

В работе представлены результаты исследования термического удаления защитной полиимидной оболочки с кварцевых капилляров пламенем бутановой и водородной горелок. При использовании бутановой горелки, пламя которой является восстановительным, на поверхности капилляра остаются продукты карбонизации полиимидного покрытия, которые необходимо удалять механически. Использование окислительного водородного пламени позволяет полностью удалить защитное покрытие без использования дополнительной механической очистки. Полученные экспериментальные результаты подтверждают целесообразность использования водородной горелки для локального удаления полиимидной оболочки с кварцевых капилляров при изготовлении капиллярных сборок.

Ключевые слова: кварцевый капилляр, полиимидное покрытие, водородная горелка, газовая горелка, капиллярная сборка

ВВЕДЕНИЕ

Основным элементом систем капиллярного электрофореза является кварцевый капилляр, в котором происходит разделение заряженных частиц под действием электрического поля [1]. Обычно используемые в подобных системах кварцевые капилляры покрыты защитной полиимидной оболочкой для обеспечения механической прочности [2]. Для получения высокой оптической прозрачности в зоне детектирования, защитную оболочку необходимо локально удалять [3]. Известны различные методы удаления защитного покрытия: термические, химические, лазерные, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки [4]. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по использованию водородной горелки для удаления полиимидного защитного покрытия с кварцевых капилляров в сопоставлении с бутановой горелкой.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БУТАНОВОЙ ГОРЕЛКИ ДЛЯ ОЧИСТКИ КАПИЛЛЯРОВ

Газовые горелки и, в частности, бутановые, широко используются для локального удаления защитного полиимидного покрытия с кварцевых капилляров при изготовлении капиллярных сборок, главным образом, из-за невысокой стоимости необходимого оборудования и материалов [3].

Максимальная температура пламени бутановой горелки составляет примерно 1300–1400 °С, что

достаточно для деструкции полиимидного покрытия. Пламя бутановой горелки является восстановительным, т.е. горение происходит при недостатке кислорода. Кислород в зоне горения полностью выгорает, в результате чего полиимидная оболочка под действием нагрева не сгорает, а карбонизируется.

После обработки пламенем горелки на поверхности капилляра образуется рыхлый черный слой на основе углерода и других продуктов деструкции полиимиды. Для удаления продуктов деструкции полиимидного покрытия необходимо использовать механическую очистку при помощи специального ножа.

Толщина кварцевых капилляров, используемых в системах капиллярного электрофореза, обычно составляет 100–500 мкм. Капилляры являются очень хрупкими, поэтому даже при незначительном усилии они могут ломаться. Кроме того, при механической очистке на капиллярах могут оставаться различные следы воздействия и трещины. Плохая воспроизводимость условий очистки, состава газовой смеси, температуры, равномерности нагрева и времени температурного воздействия также может приводить к появлению различных дефектов: неполному удалению защитной оболочки, неполной карбонизации полиимидной оболочки, деформации и оплавлению капилляров, появлению наплывов на краю защитной оболочки [5]. Все это приводит к достаточно высокому проценту брака — примерно 10% от общего числа очищаемых капилляров. Очистка капилляров при помощи бутановой горелки также имеет технологические

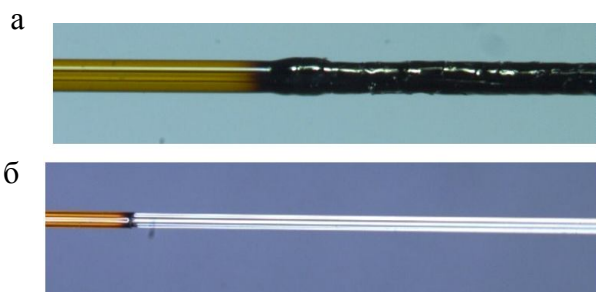


Рис. 1. Результаты очистки кварцевого капилляра пламенем бутановой горелки при оптимальных условиях.

а — карбонизированная защитная оболочка после обработки пламенем горелки, б — карбонизированный слой удален при помощи специального ножа

ограничения. На очистку одного капилляра уходит от 5 до 8 мин в зависимости от квалификации оператора. Одновременно можно очищать только один капилляр. Для очистки капилляров требуются специальные навыки и высокая концентрация внимания оператора.

Достоинством использования бутановой горелки для очистки капилляров является невысокая стоимость расходных материалов и используемого оборудования.

Экспериментальная проверка технологии удаления защитного покрытия при помощи бутановой горелки проводилась на кварцевых капиллярах Polymicro Molex [2], TSP050192 (внешний диаметр — 186 ± 6 мкм, внутренний диаметр капилляра — 50 ± 3 мкм, толщина защитной полиимидной оболочки — 14 ± 1 мкм). Перед удалением защитной оболочки капилляр помещается в специальную оправку для фиксации капилляра и ограничения зоны очистки шириной 10 мм. Для очистки капилляров использовалась газовая горелка В-597, которая заправлялась бутаном.

Результат очистки кварцевого капилляра пламенем бутановой горелки при оптимальных условиях показан на рис. 1. После обработки пламенем горелки на капилляре образуется слой из продуктов термической деструкции полиимидной оболочки (а). Механическая очистка этого слоя позволяет получить очищенный кварцевый капилляр (б), пригодный для дальнейшего использования в составе капиллярной сборки.

Удаление защитного покрытия при помощи бутановой горелки в целом позволяет получить приемлемое качество очистки при мелкосерийном изготовлении капиллярных сборок.

Однако использование бутановой горелки при крупносерийном производстве капиллярных сбо-

рок становится нецелесообразным из-за низкой производительности, необходимости дополнительной механической очистки, использования ручного труда и высокого уровня брака.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДНОГО ПЛАМЕНИ ДЛЯ ОЧИСТКИ КАПИЛЛЯРОВ

Для получения водородного пламени при очистке капилляров применялась электролизная газосварочная установка "Лига-02С" [6]. В установке используется электрохимическое разделение воды на смесь водорода и кислорода. Для увеличения эффективности процесса электролиза в воду добавляют щелочь, которая не расходуется в процессе выработки газовой смеси. Установка позволяет получать давление водород-кислородной газовой смеси до 0,4 атм. Для удаления паров воды из газовой смеси служит охладитель-обогащитель, в котором конденсируется избыточная влага. Кроме того, охладитель-обогащитель используется для введения в газовую смесь паров летучих углеводородов, таких как ацетон, бензол, этанол. Это позволяет регулировать характер пламени — от окислительного до восстановительного. В окислительном пламени имеется избыток кислорода, при этом цвет пламени желтый. В восстановительном пламени — недостаток кислорода, а цвет пламени бледно-голубой.

Максимальная температура горения водородно-кислородной смеси составляет 2600°C , что позволяет более эффективно удалять защитное полиимидное покрытие. Состав газовой смеси можно подобрать таким образом, что пламя будет окислительным, т.е. с избытком кислорода. Сочетание высокой температуры и наличие кислорода в зоне горения приводит к тому, что полиимидная оболочка на кварцевом капилляре сгорает полностью. Кварцевый капилляр после обработки водородным пламенем не требует дополнительной механической очистки, что является существенным преимуществом по сравнению с бутановой горелкой. Состав водородно-кислородной смеси является более стабильным, из-за чего воспроизводимость условий очистки более высокая. Однако более высокая температура водородного пламени по сравнению с бутановой горелкой может приводить к оплавлению и деформации самого кварцевого капилляра, поскольку температура размягчения кварца составляет $1400\text{--}1600^\circ\text{C}$. Для того чтобы кварцевый капилляр не деформировался, температурное воздействие должно быть кратковременным — достаточным для удаления защитной оболочки, но недостаточным для размягчения кварцевого капилляра. Это требует от оператора высокой концентрации внимания. Для очистки одного капилляра требуется не более 1 мин. Водород



Рис. 2. Водородная горелка "Лига-02С", используемая для удаления защитной оболочки с кварцевых капилляров

и кислород получают из дистиллированной воды путем электролиза. Стоимость оборудования также весьма невысокая. Ожидаемый уровень брака при использовании водородной горелки — не более 1%. Точное значение будет определено в процессе опытной эксплуатации.

Тестирование технологии удаления защитного покрытия при помощи водородной горелки проводилось на тех же самых кварцевых капиллярах Polymicro Molex [2], которые очищались при помощи бутановой горелки. Установка оснащалась специальным соплом с внутренним диаметром 0.5 мм, которое позволяло получить пламя необходимой мощности. Капилляры фиксировались в специальной оправке, позволяющей регулировать размеры зоны очистки.

Используемая водородная горелка и дополнительное оборудование показаны на рис. 2. Результаты очистки кварцевых капилляров представлены на рис. 3.



Рис. 3. Результат очистки капилляра пламенем водородной горелки — полиимидная оболочка полностью сгорела

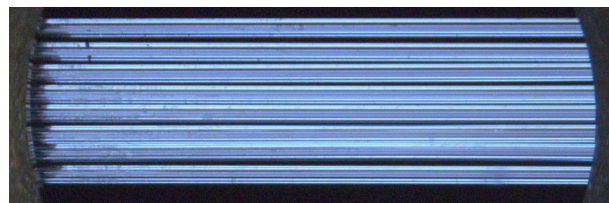


Рис. 4. Линейка капилляров, собранная из капилляров, очищенных при помощи водородной горелки

После обработки капилляров водородным пламенем защитная полиимидная оболочка полностью сгорала и никакой дополнительной механической очистки не требовалось.

Из очищенных водородной горелкой капилляров была собрана пробная линейка капилляров (рис. 4).

Проведено тестирование изготовленной линейки капилляров на геномном анализаторе "Нанофор 05" [7] (рис. 5).

Фоновое излучение в линейке капилляров в значительной степени определяется количеством центров рассеяния, которые формируются на дефектах капилляров, возникающих в процессе очистки и механического воздействия.

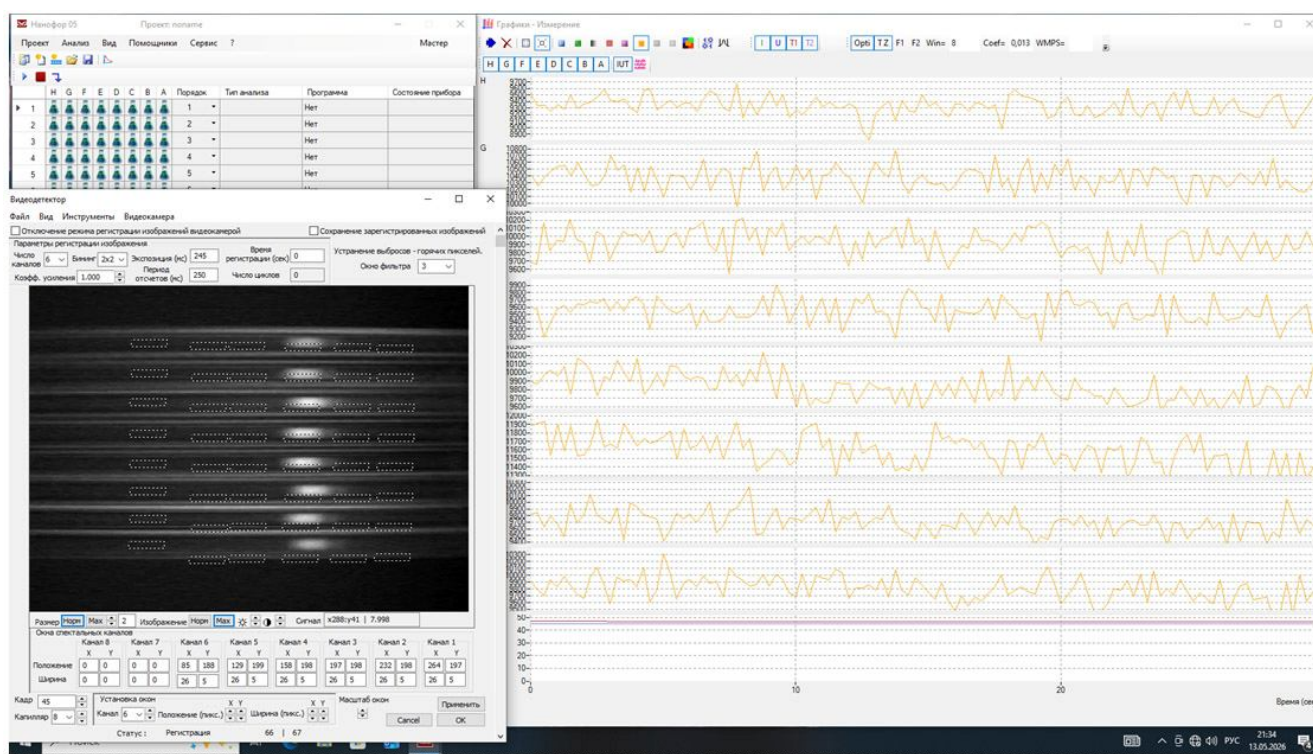


Рис. 5. Результаты тестирования пробной линейки капилляров

Величина фона, в свою очередь, определяет пороговую чувствительность геномного анализатора [8]. Фоновое излучение в линейке капилляров, изготовленных из капилляров, очищенных при помощи водородной горелки, составляет примерно 10 000 единиц, что свидетельствует о хорошем качестве очистки капилляров при помощи водородной горелки. Уровень фона линейки капилляров, изготовленных по традиционной технологии из капилляров, очищенных пламенем горелки, составляет 10 000–30 000 единиц. Также была проведена пространственная калибровка (см. Приложение). На этом рисунке отображается таблица с результатами пространственной калибровки, график с профилем рамановского рассеяния лазерного излучения на воде в капиллярах. Огибающая максимумов пиков на графике имеет колоколообразную форму с максимумом в центральных капиллярах. Пики в крайних капиллярах имеют допустимый разброс по амплитудам. Полученные экспериментальные результаты подтверждают возможность использования водородной горелки для очистки капилляров от полиимидной оболочки.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ УДАЛЕНИЯ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ С КВАРЦЕВЫХ КАПИЛЛЯРОВ ПРИ ПОМОЩИ БУТАНОВОЙ И ВОДОРОДНОЙ ГОРЕЛОК

Основным преимуществом водородной горелки по сравнению с бутановой горелкой является полное удаление защитной полиимидной оболочки, тогда как при использовании бутановой горелки необходима дополнительная механическая очистка продуктов карбонизации полиимидного покрытия. Полное сгорание полиимидной оболочки в водородном пламени обусловлено его окислительным характером. Пламя бутановой горелки является восстановительным — горение происходит при недостатке кислорода.

В таблице представлены основные параметры бутановой и водородной горелок применительно к их использованию для локального удаления защитного покрытия с кварцевых капилляров.

Таблица. Основные параметры бутановой и водородной горелок

Основные параметры	Очистка пламенем бутановой горелки	Очистка пламенем водородной горелки
Максимальная температура пламени, °С	1300	2600
Содержание кислорода в зоне очистки	Содержание кислорода низкое (восстановительное пламя)	Содержание кислорода регулируется, пламя может быть как окислительным (с избытком кислорода), так и восстановительным
Степень карбонизации в процессе очистки	Высокая	Низкая
Необходимость механической очистки	Требуется механическая очистка продуктов карбонизации полиимида. Полиимидная оболочка полностью не сгорает, происходит карбонизация	Механическая очистка не требуется. Защитная оболочка сгорает полностью
Воспроизводимость	Плохая воспроизводимость условий очистки: – нестабильность состава газовой смеси; – температуры и равномерности нагрева капилляра; – времени температурного воздействия. Условия очистки контролируются субъективно	Хорошая воспроизводимость условий очистки: – состав газовой смеси стабильный; – температура, равномерность нагрева капилляров, время температурного воздействия хорошо контролируются при использовании автоматизированной системы очистки. При ручной очистке условия обработки контролируются субъективно
Возможные дефекты	Неполное удаление защитной оболочки, разная степень карбонизации; деформация и оплавление капилляра при перегреве, наплывы на краю защитной оболочки, следы механического воздействия и трещины на капилляре, поломки капилляра при механической очистке.	Деформация и оплавление капилляра при перегреве

Таблица. Продолжение

Основные параметры	Очистка пламенем бутановой горелки	Очистка пламенем водородной горелки
Ожидаемый процент брака	Высокий процент брака при использовании газовой горелки — примерно 10.0% от общего числа очищаемых капилляров. Наличие скрытого брака (примерно 1–2%), который проявляется на этапе тестирования собранной ячейки, что критично при изготовлении 24-капиллярной ячейки	Ожидаемый процент брака не будет превышать 1% после отработки технологического режима
Скорость очистки	Для очистки одного капилляра при помощи бутановой горелки требуется от 3 до 8 мин в зависимости от квалификации оператора. Одновременно можно очищать только один капилляр	Для очистки одного капилляра при помощи водородной горелки требуется не более 1 мин. Одновременно можно очищать 10 и более капилляров. Основное время при ручной очистке тратится на укладку капилляров в оправку
Технологические особенности	Технологические ограничения — невозможность: – очистки нескольких капилляров одновременно, – очистки капилляров в собранной ЛК, – автоматизации процесса очистки	Можно очищать большое количество капилляров одновременно. Можно очищать капилляры в собранной линейке, при использовании оправки из термостойкого материала. Возможна автоматизация процесса очистки
Субъективный фактор	Требуются специальные навыки и высокая концентрации внимания	При ручной очистке требуются специальные навыки и высокая концентрации внимания. При использовании автоматизированной системы участие оператора сводится к укладке и последующему сбору очищенных капилляров. Режим сканирования задается и контролируется программой управления системой, температура обработки капилляров задается генератором водорода

Таблица. Окончание

Основные параметры	Очистка пламенем бутановой горелки	Очистка пламенем водородной горелки
Возможность использования при серийном производстве	Использование бутановой горелки при серийном производстве линеек капилляров нецелесообразно из-за низкой производительности, использования ручного труда, высокого уровня брака при очистке капилляров	Водородную горелку можно использовать при серийном производстве линеек капилляров при автоматизации процесса очистки. Использование водородной горелки обеспечивает стабильные условия очистки, высокую скорость очистки, защитное покрытие удаляется полностью — нет необходимости использовать дополнительную механическую очистку карбонизированного слоя
Стоимость оборудования	Низкая — стоимость газовой горелки	Средняя — стоимость газосварочного аппарата на воде "Лига-02"
Стоимость расходных материалов	Низкая — стоимость баллончика бутана для заправки горелки	Низкая — в качестве расходного материала используется дистиллированная вода
Уровень фона в капиллярной сборке, у.е.	10 000–30 000	10 000

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе результаты сравнительного исследования термического удаления защитной полиимидной оболочки с кварцевых капилляров пламенем бутановой и водородной горелок показывают целесообразность использования водородной горелки для локального удаления полиимидной оболочки с кварцевых капилляров при изготовлении капиллярныхборок.

При использовании бутановой горелки, пламя которой является восстановительным, на поверхности капилляра остаются продукты карбонизации полиимидного покрытия, которые необходимо удалять механически. Использование окислительного водородного пламени позволяет полностью удалить защитное покрытие без использования дополнительной механической очистки. Отсутствие механической обработки повышает качество

очистки, уменьшает светорассеяние в кварцевых капиллярах из-за минимизации следов механического воздействия, повышает скорость удаления защитного покрытия, уменьшает вероятность повреждения капилляра. Линейка капилляров, изготовленная из капилляров, очищенных при помощи водородной горелки, и протестированная в генетическом анализаторе "Нанофор 05" показала характеристики, сопоставимые с характеристиками линейки капилляров, изготовленных из капилляров, очищенных по традиционной технологии при помощи бутановой горелки.

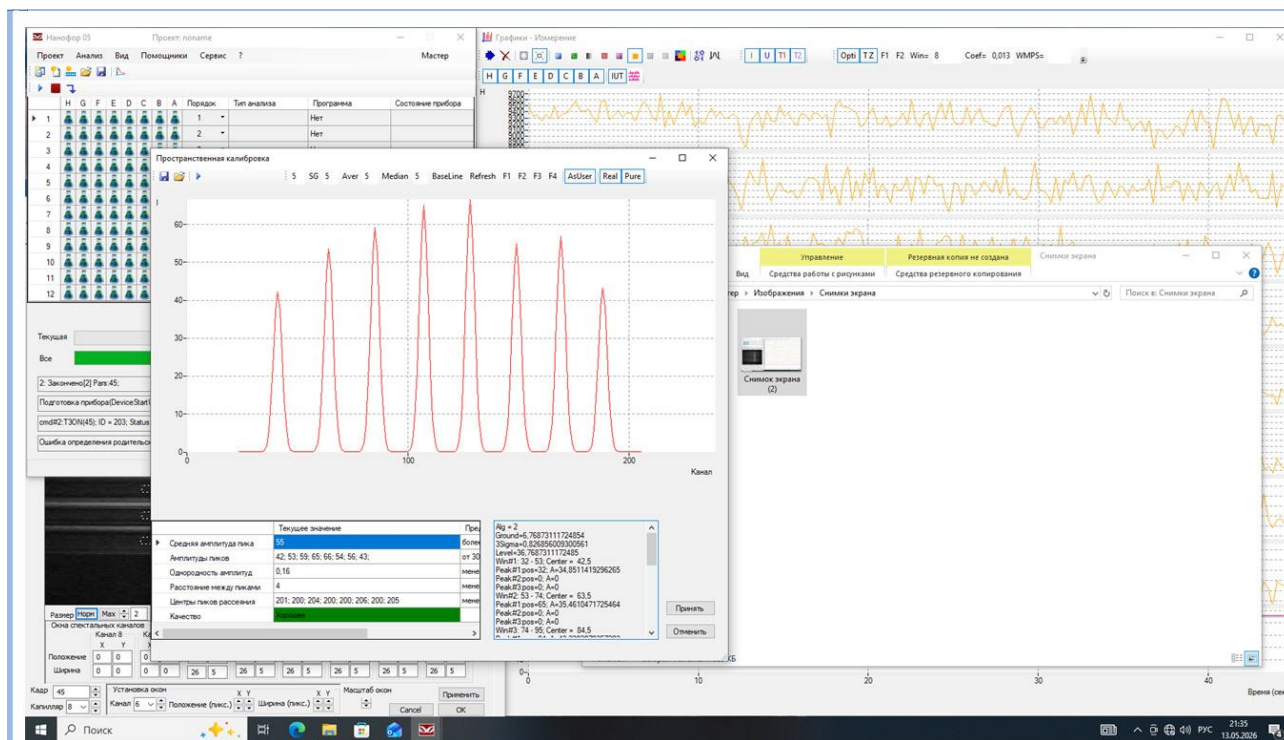
Фоновое излучение в линейке капилляров, изготовленных из капилляров, очищенных при помощи водородной горелки, составляет примерно 10 000 условных единиц, что свидетельствует о хорошем качестве очистки капилляров. Уровень фона линейки капилляров, изготовленных по традиционной технологии из капилляров, очищенных

пламенем бутановой горелки, обычно находится в пределах 10 000–30 000 условных единиц.

Полученные экспериментальные результаты подтверждают возможность использования водо-

родной горелки для локальной очистки капилляров от полиимидной оболочки при изготовлении капиллярных сборок.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Результаты пространственной калибровки

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев Я.И., Белов Ю.В., Малюченко О.П., Монахова Ю.А., Натиров А.Н., Орехов В.А., Коновалов С.В., Курочкин В.Е., Петров А.И. Генетический анализатор для фрагментного анализа ДНК // Научное приборостроение. 2012. Т. 22, № 4. С. 86–92. URL: <http://iairas.ru/mag/2012/full4/Art12.pdf>
2. Polymicro Capillary Tubing Documentation. <https://www.molex.com/en-us/products/capillary-tubing/capillary-tubing-documentation>
3. Курочкин В.Е., Владимиров Ф.Л., Альдекеева А.С., Корнева Н.А., Волков М.В., Шляхтин М.С., Журба Д.В. Лазерная технология удаления полиимидного покрытия с кварцевых капилляров // Научное приборостроение. 2025. Т. 35, № 2. С. 3–19. URL: <http://iairas.ru/mag/2025/full2/Art1.pdf>
4. Polyimide Removal from Silica Fibers or Tubes. https://www.molex.com/content/dam/molex/molex-dot-com/en_us/pdf/product-reference-guides/polymicro/user-guidelines/polyimide_removal_from_silica_fibers_or_tubes.pdf?inline
5. Курочкин В.Е., Владимиров Ф.Л., А.С. Альдекеева А.С., Корнева Н.А., Волков М.В., Шляхтин М.С., Журба Д.В. Лазерная технология очистки кварцевых капилляров от защитной оболочки // АналитБиоПрибор-2024: Тезисы докладов Третьей ежегодной всероссийской молодежной конференции по методам и приборам для анализа биологических объектов. Санкт-Петербург, 2024. С. 111–115. DOI: 10.52565/9785911553333
6. ВЭМЗ. Руководство по эксплуатации на сварочный аппарат "Лига". <http://www.zaovemz.ru/info/manual/>

7. Курочкин В.Е., Алексеев Я.И., Петров Д.Г., Евстапов А.А. Отечественные приборы для молекулярно-генетического анализа: разработки ИАП РАН и ООО "Синтол" // Известия Российской Военно-медицинской академии. 2021. Т. 40, № 3. С. 69–74. DOI: 10.17816/rmmar76918
8. Курочкин В.Е., Владимиров Ф.Л., Альдекеева А.С., Корнева Н.А. К вопросу об аналитической чувствительности генетического анализатора // Научное приборостроение. 2025. Т. 35, № 4. С. 47–60. URL: <http://iairas.ru/mag/2025/full4/Art4.pdf>

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Контакты: Владимиров Федор Львович,
fedor.vlv3008@gmail.com

Материал поступил в редакцию 08.06.2026

FEATURES OF USING BUTANE AND HYDROGEN TORCHES FOR REMOVING PROTECTIVE COATING FROM QUARTZ CAPILLARIES

F. L. Vladimirov, A. S. Al'dekeeva, A. A. Fedorov

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint Petersburg, Russia

This article presents the results of a study on the thermal removal of a protective polyimide coating from quartz capillaries using butane and hydrogen torches. When using a butane torch, whose flame is reducing, carbonization products of the polyimide coating remain on the capillary surface and must be removed mechanically. Using an oxidizing hydrogen flame allows for complete removal of the protective coating without the need for additional mechanical processing of the capillaries. The experimental results demonstrate that using a hydrogen torch for localized removal of the polyimide coating from quartz capillaries is promising for serial production of capillary arrays.

Keywords: quartz capillary, polyimide coating, hydrogen torch, gas torch, capillary array

REFERENCES

1. Alekseev Ya.I., Belov Yu.V., Malyuchenko O.P., Monakhova Yu.A., Natyrov A.N., Orekhov V.A., Kononov S.V., Kurochkin V.E., Petrov A.I. [Genetic analyser for DNA fragment analysis]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2012, vol. 22, no. 4, pp. 86–92. URL: <http://iairas.ru/mag/2012/full4/Art12.pdf> (In Russ.).
2. MOLEX. *Polymicro Capillary Tubing Documentation*. URL: <https://www.molex.com/en-us/products/capillary-tubing/capillary-tubing-documentation>
3. Kurochkin V.E., Vladimirov F.L., Al'dekeeva A.S., Korneva N.A., Volkov M.V., Shlyakhtin M.S., Zhurba D.V. [Laser technology for removing polyimide coating from quartz capillaries]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2025, vol. 35, no. 2, pp. 3–19. URL: <http://iairas.ru/mag/2025/full2/Art1.pdf> (In Russ.).
4. *Polyimide Removal from Silica Fibers or Tubes*. URL: [https://www.molex.com/content/dam/molex/molex-dot-](https://www.molex.com/content/dam/molex/molex-dot-com/en_us/pdf/product-reference-guides/polymicro/user-guide-lines/polyimide_removal_from_silica_fibers_or_tubes.pdf?inline)
[com/en_us/pdf/product-reference-guides/polymicro/user-guide-lines/polyimide_removal_from_silica_fibers_or_tubes.pdf?inline](https://www.molex.com/content/dam/molex/molex-dot-com/en_us/pdf/product-reference-guides/polymicro/user-guide-lines/polyimide_removal_from_silica_fibers_or_tubes.pdf?inline)
5. Kurochkin V.E., Vladimirov F.L., Al'dekeeva A.S., Korneva N.A., Volkov M.V., Shlyakhtin M.S., Zhurba D.V. [Laser technology for removing the protective coating from quartz capillaries]. *Tezisy dokladov Tret'ei ezhegodnoi vs Rossiiskoi molodezhnoi konferentsii po metodam i priboram dlya analiza biologicheskikh objektov: "AnalitBioPribor-2024"* [Proc. III Ann. All-Russ. Youth Conference on Methods and Instruments for the Analysis of Biological Samples: "AnalytBioInstrument-2024"], Saint-Petersburg, 2024, pp. 111–115. (In Russ.). DOI: 10.52565/9785911553333
6. VEHMZ. *Rukovodstvo po ehkspluatatsii na svarochnyi apparat "Liga"* [Operating Manual for the “Liga” Welding Machine]. URL: <http://www.zaovemz.ru/info/manual/> (In Russ.).

7. Kurochkin V.E., Alekseev Y.I., Petrov D.G., Evstratov A.A. [Domestic devices for molecular genetic analysis: developments of the IAP RAS and SINTOL LLC]. *Izvestiya Rossiiskoi Voenno-meditsinskoi akademii* [Russian Military Medical Academy Reports], 2021, vol. 40, no. 3, pp. 69–74. DOI: 10.17816/rmmar76918 (In Russ.).
8. Kurochkin V.E., Vladimirov F.L., Al'dekееva A.S., Korneva N.A. [Concerning analytical sensitivity of a genetic analyzer]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2025, vol. 35, no. 4, pp. 47–60. URL: <http://iairas.ru/mag/2025/full4/Art4.pdf> (In Russ.).

Contacts: *Vladimirov Fedor L'vovich*,
fedor.vlv3008@gmail.com

The article was received by the editorial office on 08.06.2026

INTRODUCTION

The main element of capillary electrophoresis systems is a quartz capillary, in which the separation of charged particles occurs under the influence of an electric field [1]. Quartz capillaries commonly used in such systems are coated with a protective polyimide shell to ensure mechanical strength [2]. To obtain high optical transparency in the detection zone, the protective shell must be locally removed [3]. Various methods for removing the protective coating are known: thermal, chemical, laser, each of which has its own advantages and disadvantages [4]. This paper presents experimental results on the use of a hydrogen torch in comparison with a butane torch to remove the polyimide protective coating from quartz capillaries.

USING A BUTANE TORCH TO CLEAN CAPILLARIES

Gas torches, particularly butane torches, are widely used for the localized removal of the protective polyimide coating from quartz capillaries during the fabrication of capillary assemblies, primarily due to the low cost of the necessary equipment and materials [3].

The maximum flame temperature of a butane torch is approximately 1300–1400 °C, which is sufficient to destroy the polyimide coating. A butane torch flame is reducing, meaning combustion occurs in the absence of oxygen. Oxygen in the combustion zone completely burns off, resulting in the polyimide coating being carbonized rather than burned under the influence of heat.

After treatment with the torch flame, a loose black layer of carbon and other polyimide degradation products forms on the capillary surface. To remove degradation products from the polyimide coating, mechanical cleaning with a special knife is necessary.

The thickness of the quartz capillaries used in capillary electrophoresis systems is typically 100–500 μm . Capillaries are very fragile, so even minor force can cause them to break. Furthermore, mechanical cleaning can leave various marks and cracks on the capillaries. Poor reproducibility of cleaning conditions, gas mixture composition, temperature, heating uniformity, and thermal exposure time can also lead to various defects: incomplete removal of the protective coating, incomplete carbonization of the polyimide coating, deformation and melting of the capillaries, and the appearance of burrs on the edge of the protective coating [5]. All this leads to a fairly high percentage of defects—approximately 10% of the total number of capillaries cleaned. Cleaning capillaries with a butane torch also has technological limitations. Cleaning one capillary takes 5 to 8 minutes, depending on the operator's skill level. Only one capillary can be cleaned

at a time. Cleaning capillaries requires specialized skills and high operator concentration.

The advantage of using a butane torch for cleaning capillaries is the low cost of consumables and equipment.

An experimental test of the technology for removing the protective coating using a butane torch was conducted using Polymicro Molex TSP050192 [2] quartz capillaries (outer diameter $186 \pm 6 \mu\text{m}$, inner diameter $50 \pm 3 \mu\text{m}$, protective polyimide shell thickness $14 \pm 1 \mu\text{m}$). Before removing the protective shell, the capillary is placed in a special holder to secure the capillary and limit the cleaning zone to a width of 10 mm. A B-597 gas torch, fueled with butane, was used to clean the capillaries.

The result of cleaning the quartz capillary with a butane torch flame under optimal conditions is shown in Fig. 1. After flame treatment, a layer of thermal degradation products of the polyimide shell forms on the capillary (a). Mechanical cleaning of this layer produces a clean quartz capillary (б), suitable for further use in a capillary assembly.

Fig. 1. Results of cleaning a quartz capillary with a butane torch flame under optimal conditions.
a — carbonized protective shell after flame treatment;
б — carbonized layer removed with a special knife

Removing the protective coating with a butane torch generally provides acceptable cleaning quality for small-scale production of capillary assemblies.

However, using a butane torch for large-scale production of capillary assemblies becomes impractical due to low productivity, the need for additional mechanical cleaning, the use of manual labor, and a high rate of defects.

USE OF HYDROGEN FLAME FOR CAPILLARY CLEANING

A Liga-02C electrolytic gas welding unit [6] was used to generate a hydrogen flame for capillary cleaning. The setup utilizes electrochemical separation of water into a mixture of hydrogen and oxygen. To increase the efficiency of the electrolysis process, alkali is added to the water; this alkali is not consumed in the gas mixture production. The setup allows hydrogen-oxygen gas mixture to achieve pressures of up to 0.4 atm. A cooler-enricher, in which excess moisture is condensed, removes water vapor from the gas mixture. The cooler-enricher is also used to introduce volatile hydrocarbon vapors, such as acetone, benzene, and ethanol, into the gas mixture. This allows the flame character to be controlled — from oxidizing to reducing. An oxidizing flame has an excess of oxygen, resulting in a yellow flame color. A reducing

flame has a deficiency of oxygen, resulting in a pale blue flame color.

The maximum combustion temperature of a hydrogen-oxygen mixture is 2600°C, allowing for more efficient removal of the protective polyimide coating. The composition of the gas mixture can be adjusted so that the flame is oxidizing, i.e., with an excess of oxygen. The combination of high temperature and the presence of oxygen in the combustion zone results in the complete combustion of the polyimide coating on the quartz capillary. After treatment with a hydrogen flame, the quartz capillary does not require additional mechanical cleaning, which is a significant advantage compared to a butane torch. The composition of the hydrogen-oxygen mixture is more stable, resulting in higher reproducibility of cleaning conditions. However, the higher temperature of a hydrogen flame compared to a butane torch can lead to melting and deformation of the quartz capillary itself, since the softening point of quartz is 1400–1600°C. To prevent deformation of the quartz capillary, the temperature exposure must be short — sufficient to remove the protective coating, but not sufficient to soften the quartz capillary. This requires high operator concentration. Cleaning one capillary takes no more than 1 minute. Hydrogen and oxygen are obtained from distilled water by electrolysis. The equipment is also quite inexpensive. The expected defect rate when using a hydrogen torch is no more than 1%. The exact value will be determined during trial operation.

Testing of the protective coating removal technology using a hydrogen torch was conducted on the same Polymicro Molex quartz capillaries [2], which were cleaned using a butane torch. The setup was equipped with a special nozzle with an internal diameter of 0.5 mm, which allowed the flame to be generated with the required power. The capillaries were fixed in a special mandrel, allowing the cleaning zone to be adjusted.

The hydrogen torch used and additional equipment are shown in Fig. 2.

Fig. 2. The Liga-02C hydrogen torch used to remove the protective coating from quartz capillaries

The results of cleaning the quartz capillaries are presented in Fig. 3.

Fig. 3. The result of cleaning the capillary with a hydrogen torch flame is that the polyimide shell is completely burned

After treatment with a hydrogen flame, the protective polyimide coating completely burned off, and no further mechanical cleaning was required.

A test array was assembled from the capillaries cleaned with a hydrogen torch (Fig. 4).

Fig. 4. A capillary array assembled from capillaries cleaned with a hydrogen torch

The manufactured capillary array was tested on the NanoFor 05 genomic analyzer [7] (Fig. 5).

Fig. 5. Results of the trial capillary array test

Background radiation in the capillary array is largely determined by the number of scattering centers that form on capillary defects that arise during cleaning and mechanical stress.

The background radiation, in turn, determines the threshold sensitivity of the genomic analyzer [8]. The background radiation in the capillary array made from capillaries cleaned with a hydrogen torch is approximately 10 000 units, indicating good quality capillary cleaning using a hydrogen torch. The background level of a capillary array manufactured using traditional technology from flame-cleaned capillaries is 10 000–30 000 units. Spatial calibration was also performed (Fig. 5).

Figure 5 displays a table with the spatial calibration results and a graph showing the Raman scattering profile of laser radiation on water in the capillaries. The envelope of the peak maxima in the graph is bell-shaped, with the maximum in the central capillaries. The peaks in the outer capillaries have an acceptable amplitude spread. The experimental results confirm the feasibility of using a hydrogen torch to clean capillaries of their polyimide coating.

COMPARISON OF METHODS FOR REMOVING THE PROTECTIVE COATING FROM QUARTZ CAPILLARIES USING BUTANE AND HYDROGEN TORCHES

The main advantage of a hydrogen torch over a butane torch is the complete removal of the protective polyimide coating, whereas using a butane torch requires additional mechanical cleaning of the carbonization products of the polyimide coating. Complete combustion of the polyimide coating in a hydrogen flame is due to its oxidizing nature. The flame of a butane torch is reducing — combustion occurs in the absence of oxygen.

The table presents the main parameters of butane and hydrogen torches applicable to their use for loca-

lized removal of the protective coating from quartz capillaries.

Tab. Main features of butane and hydrogen torches

CONCLUSION

The results of a comparative study of thermal removal of the protective polyimide coating from quartz capillaries using a butane and hydrogen torch flame demonstrate the feasibility of using a hydrogen torch for localized removal of the polyimide coating from quartz capillaries during the fabrication of capillary assemblies.

When using a butane torch, which flame is reducing, carbonization products of the polyimide coating remain on the capillary surface and must be removed mechanically. Using an oxidizing hydrogen flame allows for complete removal of the protective coating without additional mechanical cleaning. The absence of mechanical processing improves cleaning quality, reduces light scattering in quartz capillaries by minimizing traces of mechanical impact, increases the speed of protective coating removal, and reduces the likelihood of capillary damage. When examined in the

Nanofor 05 genetic analyzer, an array of capillaries generated from capillaries cleaned with a hydrogen torch showed characteristics similar to those of an array of capillaries made from capillaries cleaned using conventional technique with a butane torch.

The background radiation in the arrays of capillaries made from capillaries cleaned with a hydrogen torch is approximately 10 000 conventional units, indicating good quality capillary cleaning. The background level of a capillary array manufactured using traditional technology from capillaries cleaned with a butane torch flame is typically in the range of 10 000–30 000 conventional units.

These experimental results confirm the feasibility of using a hydrogen torch for localized cleaning of capillaries from the polyimide shell during the fabrication of capillary assemblies.

APPENDIX

Spatial calibration results