

УДК 537.523

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-399-406

EDN: QXUAYS

PACS: 52.80.-s, 92.60.Pw



Воздействие струи плазмы капиллярного плазмотрона на металлы

В. А. Байдак, В. Л. Бычков, Д. Е. Сороковых, Д. В. Бычков, Д. Н. Ваулин

Проведены эксперименты по воздействию струи капиллярного плазмотрона на стальные, медные образцы и проволоки из припой. Энергия, вложенная в разряд, варьировалась от 0,3 до 1,5 кДж. При этом при взаимодействии струи капиллярного плазмотрона с припоем происходило образование компактных долгоживущих светящихся образований (КСО). При воздействии на припой получены КСО с необычно большими размерами внешним диаметром до 1,5 см, внутренним диаметром до 0,5 см и временем жизни до 7 с, которые состоят из ядра и оболочки и обладают плотностью энергии сравнимой с плотностью энергии горючих материалов.

Ключевые слова: капиллярный плазмотрон, струя, воздействие на образцы, сталь, медь, припой, образование компактных долгоживущих светящихся объектов.

Введение

Во второй половине XX века в связи с исследованиями плазмы разрядов различного типа в атмосфере с целью применения в плазменной аэродинамике появились такие понятия, как «долгоживущие плазменные образования» (ДПО) и «долгоживущие светящиеся образования» (ДСО). Это светящиеся объекты, получались в разрядных экспериментах при создании при исследовании воздействия плазмы на различные газы и материалы. Под словом «долгоживущие» образования подразумевается тот факт, что время их существо-

вания (например, время свечения) намного превышает их характерное время создания при помощи какого-либо источника плазмы. Другой их особенностью является их автономность, то есть способность свободно перемещаться в пространстве, сохраняя свою форму, размер и цвет в течение времени, сравнимого с временем существования. В [1–3] было сделано утверждение о том, что, струя эрозионной плазмы является лабораторным аналогом ШМ. Эта аналогия выглядит достаточно искусственной (и вызывает протест у тех, кто видел настоящие ШМ), поскольку поток движущейся плазмы ни по форме, ни по характеру движения никак не напоминает ШМ. При этом в этих работах было уделено недостаточно внимания процессам воздействия струй на поверхность образцов, в частности металлических, поскольку предполагалось что долгоживущие плазменные образования, в приложениях будут воздействовать в основном на воздух. В работах [4–6] происходили исследования по воздействию плазмы на металлы с получением твердых сфер с размерами от долей до нескольких мм. В [4] при электровзрыве металлических пластин иногда неожиданно появлялись полые сферы. В [5] при воздействии капиллярного разряда на ме-

Байдак Владимир Алексеевич, студент.
Бычков Владимир Львович, с.н.с., доцент, д.ф.-м.н.
E-mail: bychvl@gmail.com
Сороковых Дмитрий Евгеньевич, студент.
E-mail: sorokovykh.de19@physics.msu.ru
Бычков Дмитрий Владимирович, студент.
Ваулин Дмитрий Николаевич, с.н.с., к.ф.-м.н.
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова, физический факультет.
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 14.06.2023

После доработки 4.09.2023

Принята к публикации 18.09.2023

© Байдак В. А., Бычков В. Л., Сороковых Д. Е.,
Бычков Д. В., Ваулин Д. Н., 2023

таллические проволоки и пластины регулярно получались миллиметровые и более сферы.

Получению твердых сфер был посвящен ряд работ [6–10], основной интерес в нём представило получение микроскопических и наносфер. Так, они были получены в плазме [10], в газовой фазе при помощи физического осаждения [9] и при помощи лазерной абляции. Для получения наночастиц [9] необходима взрывная нуклеация, сменяющаяся их медленным контролируемым ростом. Однако исследования появления крупных (диаметром мм и более частиц) целенаправленно не проводились. Опыты [4, 5, 10] ставят вопросы о возможности появления полых структур и сфер в плазменных условиях.

В связи со светящимися сферами следует вспомнить крупные светящиеся сферы, получающиеся, в так называемом, Гатчинском разряде [11], впервые полученные в 2000 г. В нём из электрода, находящегося на поверхности жидкости, при втором электроде – на дне сосуда при разряде появляется светящееся образование (не всегда сферическое) [12]. Существующие плазменные теории [11] не могут объяснить форму такого разряда. Предложенная теория [13, 14] рассматривает данное образование, как вихрь, появляющийся над поверхностью сосуда при локальном вложении энергии разрядом. При этом временные и пространственные характеристики вихря [14] совпадают с экспериментальными.

Из изложенного выше следует, что в настоящее время нет единого подхода, объясняющего появление полых объёмных структур в газоразрядных условиях.

Целью данной работы является углубление изучения взаимодействия струй плазмы с поверхностью металлов, таких как сталь, медь и припой, когда в экспериментах регулярно происходит образование компактных долгоживущих светящихся образований (КСО) не являющимися струями плазмы, а объектами, реализующимися при взаимодействии плазмы с металлом. Интерес представляют эти образования в целях использования, в качестве различных добавок в химических производствах и горючее в плазменной аэродинамике. В этом случае в область воспламенения будут впрыскиваться КСО, которые будут облегчать само воспламенение и горение топлива.

Капиллярный плазмотрон

Для проведения экспериментов по созданию плазменной струи используется капиллярный плазмотрон [5, 6]. Его принципиальная схема представлена на рис. 1. Она представляет собой цепь, включающую в себя иницирующую емкость, коммутатор, батарею конденсаторов и разрядное устройство, в состав которого входят плоские электроды, разделенные диэлектриком с капилляром.

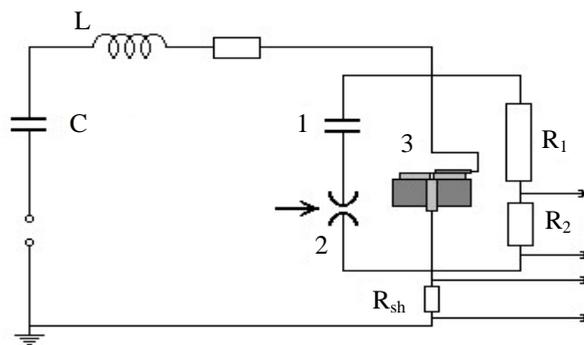


Рис. 1. Общая схема капиллярного плазмотрона: 1 – иницирующая емкость; 2 – коммутатор; 3 – капилляр; R_1 , R_2 – сопротивления делителя напряжения; R_{sh} – сопротивление шунта для определения тока разряда; C – батарея конденсаторов

Обычно капиллярный плазмотрон обладает следующими характеристиками: длительность импульса 7 мс, энергия в импульсе 200–220 Дж, напряжение на разрядном промежутке 300–310 В, максимальное значение тока в импульсе 100–120 А. Значение коэффициента деления делителя напряжения, состоящего из сопротивлений R_1 и R_2 , используемого для снятия зависимости напряжения на разрядном промежутке от времени: 1 к 100. Сопротивление шунта R_{sh} – 0,013 Ом.

Измерения температуры и распределение электронной концентрации в струе плазмы, создаваемой при помощи данного плазмотрона с использованием капилляра из оргстекла были проведены в работе [2]. Из них следовало, что концентрация электронов (ионов) изменяется вдоль оси разряда в диапазоне 10^{16} – 10^{18} см⁻³ а в радиальном направлении в пределах 10^{15} – 10^{17} см⁻³. При этом аксиальное распределение температуры в плазменной струе составляло 5000–6000 К по высоте около 8–9 см и радиальное распределение температуры 4000–6000 К по радиусу около 6 мм. Как следует из приведенных измерений тем-

пература плазмы, в отличие от плотности электронов, слабо меняется как вдоль оси разряда, так и по его радиусу, при этом изменяется в диапазоне 4000–6000 К. Типичная временная зависимость вольтных и амперных характеристик представлены на рис. 2.

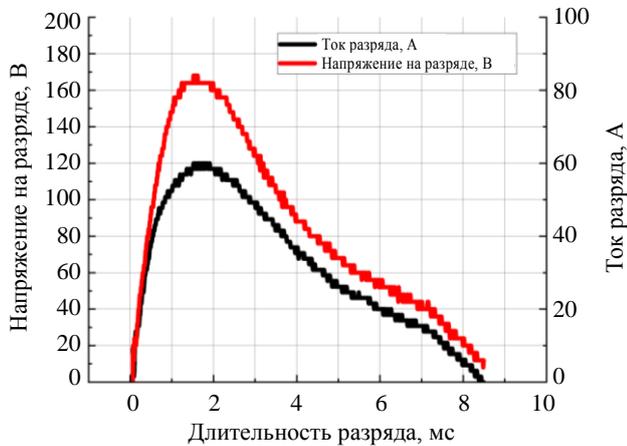


Рис. 2. Типичная временная зависимость вольтных и амперных характеристик разряда

Взаимодействие струи плазмотрона с металлом

В работе [5] были проведены эксперименты по исследованию взаимодействия плазменной струи, созданной эрозионным капиллярным разрядом с тонкими проволочками, размещенными в струе. Над выходным отверстием (капилляром), из которого струя плазмы выбрасывается в воздух, расположена металлическая проволока, которая используется для

формирования компактных долгоживущих светящихся образований (КСО) при взаимодействии плазмы с металлом проволоки (см. рис. 2).

Прямо над капилляром плазмотрона размещались проволочки из образцов стали, меди и оловянно-свинцового припоя (ПОС-40) (Sn – 59–61 %, Pb – 39–41 %) диаметром 1,5 мм. Нижняя часть проволоки (длиной ~ 0,3–5 мм) нагревалась и оплавлялась, в зависимости от энергии, вложенной в разряд. Кроме того, из тонкой проволоки вместе со струёй, по направлению её распространения, ее материал вылетает вместе с плазменной струей в виде компактных светящихся объектов (диаметром около 0,5 мм), которые отлавливались в ванночках с водой. Скорость, с которой шарики вылетали из тонкой проволоки, была порядка 5 м/с. Время свечения таких шариков составляло до 5 и более секунд.

При проведении дальнейших исследований светящиеся объекты падали на белые листы бумаги, оставляя на них следы в виде следов капель и звезд группы линий из центра. В некоторых случаях были обнаружены сплошные сферы и разрушенные бесформенные кусочки металла. При этом было сделано предположение [8–10], что звездам соответствуют объекты с оболочкой, заполненной паром, которые при падении на бумагу разрушались, а их энергия передавалась разлетающимся каплям жидкости-конденсирующегося пара.

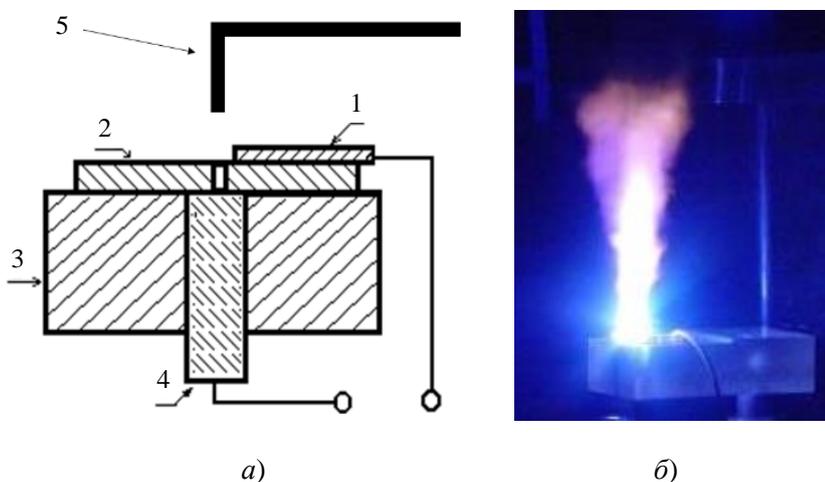


Рис. 3. Схема воздействия капиллярного плазмотрона на металл: а) — 1, 4 — электроды; 2 — диэлектрическая пластина с капилляром (разрядная камера); 3 — станция плазмотрона из оргстекла; 5 — металлическая проволока; б) — струя разряда с капилляром из оргстекла

Для анализа вылетающих КСО рядом с экспериментальной установкой располагались ванночки с водой, в которые КСО падали. После серии экспериментов были обнаружены частицы двух типов: первые, которые находились на дне ванны, и вторые, которые плавали на поверхности воды. Те сферы, которые находились на поверхности жидкости, представляют собой полые частицы (пузыри) с металлическим ядром внутри, радиус которого раза в 3–4 меньше радиуса полый сферы.

Средний радиус этих плавающих сфер составлял 1 мм. При попытке вытащить сферу из кюветы, она разрушалась.

В исследованиях с припоем внутри оболочки было обнаружено металлическое ядро. Диаметр ядра составлял около 600–640 мкм, а оценка толщины оболочки составила 12 мкм.

Ниже на рис. 4 ниже представлены примеры артефактов КСО: ядра и разрушенной оболочки.

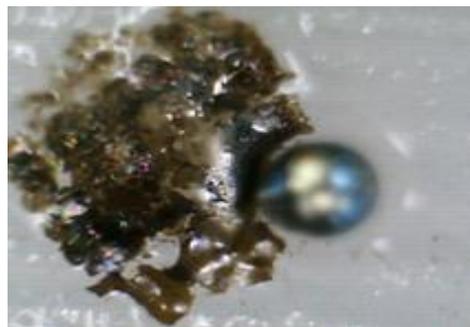


Рис. 4. Внешний вид артефактов ДСО: оболочка и выпавшее ядро

Кроме того, ядра были проанализированы при помощи сканирующего электронного микроскопа, а также определён их процентный атомный состав, см. рис. 5а–в и таблицу 1.

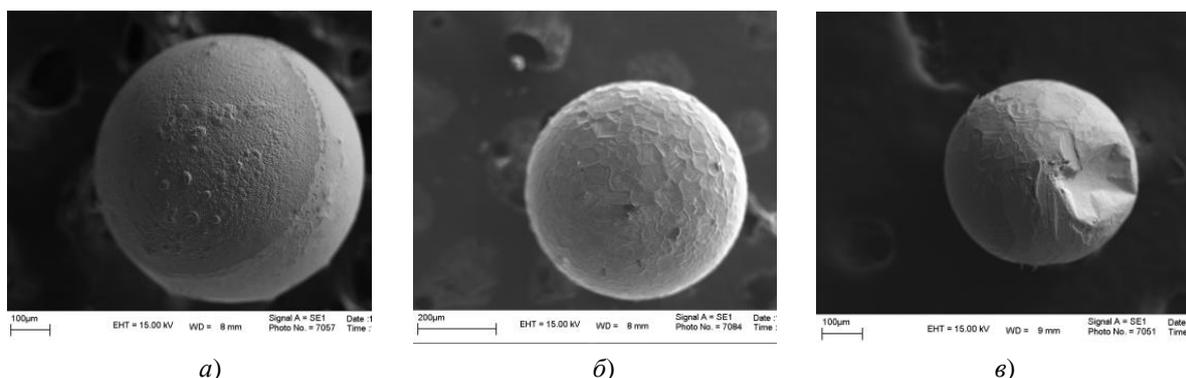


Рис. 5. Изображения ядер, полученные на сканирующем электронном микроскопе (d – диаметр). а) – сталь ($d = 570$ мкм); б) – медь ($d = 660$ мкм); в) – ПОС-40 ($d = 460$ мкм)

Таблица 1

Процентный атомный состав ядер

Химический элемент	Доли химических элементов, %		
	Сталь (Fe + C)	Медь (Cu)	ПОС-40 (40 % Sn и 60 % Pb)
Углерод (C)	19	29	–
Кислород (O)	51	14	48
Железо (Fe)	30	–	–
Медь (Cu)	–	58	–
Олово (Sn)	–	–	40
Свинец (Pb)	–	–	12

Примечание: стандартное отклонение значений составляет не более 10 %.

Исследования отдельных КСО

В экспериментах, с вложенной энергией в импульсе 200–220 Дж, для того чтобы получить отдельные КСО из ПОС-40 использовались различные жидкости, а именно: вода,

глицерин и спирт. При соприкосновении с поверхностью глицерина, большая часть КСО разрушались, в то время как при соприкосновении с поверхностью спирта КСО сохранялись и тонули, но некоторые образования разрушались при падении на дно кюветы.

В случае с водой некоторые образцы тонули, а некоторые разбивались при ударе о поверхность жидкости. Во всех трех случаях крепкие образования удавалось проанализировать. После разрушения оболочки КСО, выпадало ядро. В состав полученных ядер входит Al_2O_3 , Pb, Sn. В состав одного образца входил также углерод. При этом ядра имеют разные цвета.

Были получены снимки оболочек ядер с помощью сканирующего электронного микроскопа, представленные на рис. 6.

В состав оболочек входит преимущественно углерод или кислород и около 3-х процентов различных материалов, таких как цинк, сера, натрий, титан, медь, кремний,

мышьяк, тантал, 20–30 % алюминия. На рис. 7 представлен рентгеновский спектр одного из ядер КСО и одного из образцов оболочки.

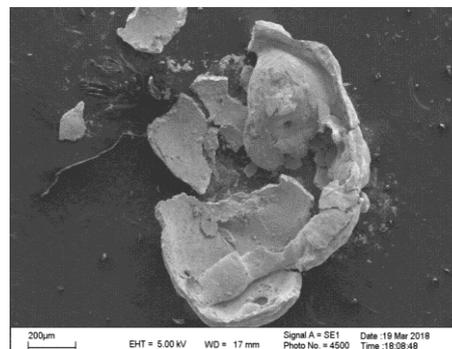
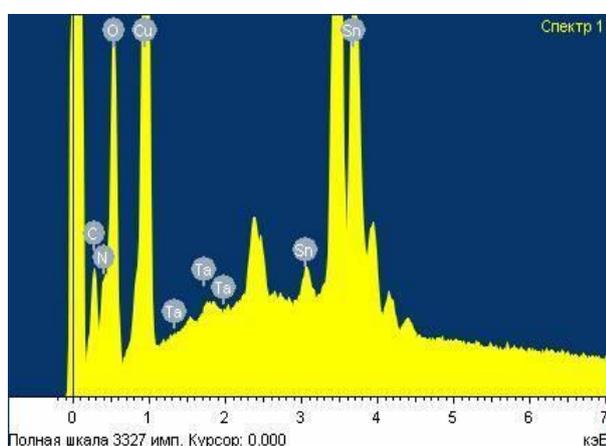
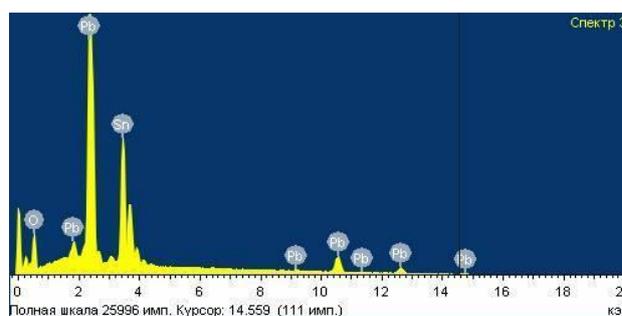


Рис. 6. СЭМ фотография оболочки КСО



а)



б)

Рис. 7. а) – рентгеновский спектр оболочки одного из образцов, полученный на СЭМ; б) – рентгеновский спектр ядра КСО

Получение КСО при увеличенном вкладе энергии в струю

С целью получения крупных КСО также использовался капиллярный плазмотрон.

В таблице 2 представлены рассчитанные параметры этого капиллярного плазмотрона. Из полученных результатов видно, что при увеличении, вкладываемой в разряд энергии увеличиваются ток и напряжение на разряде, а также его длительность. При этом в разряде расходуется около 5–7 % изначально вложенной энергии. Энергия, идущая в разряд, рассчитывалась по осциллограммам (по кривым тока и напряжения), при помощи численного интегрирования.

При увеличении энергии в разряде увеличивается ширина плазменного столба. При

этом высота столба сначала достигает некоторого максимума после чего начинает падать. Кроме того, изменяется форма разряда: при малых энергиях она имеет узкую цилиндрическую форму с заостренным окончанием, а при больших энергиях форма приобретает вид расширяющегося конуса.

В этой серии были также проведены эксперименты по получению КСО. Для этого также прямо над капилляром размещалась проволочка, состоящая из ПОС-61 (61 % олова и 39 % свинца). За счет увеличения вложенной энергии получилось большее количество КСО, притом более крупных размеров. Результат взаимодействия плазменной струи с проволочкой был запечатлен на видео. На всех фотографиях, представленных ниже, использовалась наибольшая доступная энергия, вкладываемая в разряд, примерно 1,5 кДж.

Таблица 2

Параметры капиллярного плазмотрона

Напряжение батареи конденсаторов, В	Емкость батареи конденсаторов, мкФ	Энергия, вложенная в разряд, кДж	Рассчитанная энергия, Дж	Доля энергии, %	Максимальный ток, А	Максимальное напряжение, В	Длительность, мс
300	3,2	0,15	19,1	13	60,0	130	7,2
	6,5	0,3	37,0	12	62,0	170	14,9
	9,8	0,44	48,0	11	65,0	175	14,6
	13	0,6	62,0	10	70,0	180	15,4
	16,4	0,74	78,5	11	80,0	190	25,3
	20,0	0,9	150	17	95	200	40

Примечание: в таблице приведены средние, округлённые значения, стандартное отклонение составляет не более 10 %.

На рисунке 8 и рисунке 9 представлены кадры из видео. На рисунке 8 запечатлен кадр множественного существования КСО. Полное время наблюдения составляло примерно 6–7 с.



Рис. 8. Поведение множественных КСО

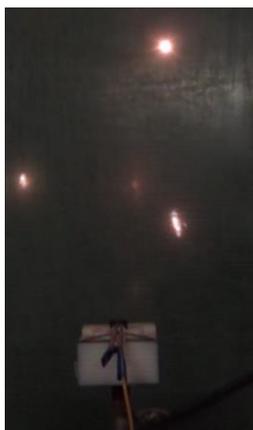


Рис. 9. Поведение одиночного КСО

На рисунке 9 представлен кадр движения одиночного КСО. Характерные видимые размеры таких КСО составляли примерно 0,5–1 см, а их время жизни составляло порядка 5–7 с. Некоторые из таких КСО взрывались при падении на поверхность стола или бумаги, разделяясь на КСО меньших размеров. В результате чего они оставляли следы на бумаге,

как показано на рисунке 10. Эти фотографии аналогичны полученным в [11]. Полученные объекты содержали газ под оболочкой, который выходил при разрушении КСО, создавал звук и влиял на прыжки КСО.



Рис. 10. След взрыва КСО

Во всех проведенных экспериментах движение КСО можно описать следующим образом. При соприкосновении с поверхностью КСО подпрыгивали на некоторую высоту порядка нескольких сантиметров, потом снова падали и снова подпрыгивали. Такое движение наблюдалось в течение всего времени их жизни, при этом амплитуда каждого последующего прыжка уменьшалась. Кроме того, во время взрыва КСО амплитуда прыжка могла значительно увеличиться. Во время экспериментов было зарегистрировано, что образующиеся КСО могли взрываться при столкновении с поверхностью бумаги, разделяясь на шарики меньшего размера, а также прыгать по её поверхности, оставляя на ней следы, как показано на рисунке 10. Размер следа от взрыва на данном рисунке составляет порядка

6 мм. Это говорит о том, что диаметр светящегося и разогретого КСО примерно в 10 раз превышает диаметр остывших ядер.

Для уточнения свойств КСО сделаем также оценку размеров КСО из припоя, используя уравнение Менделеева–Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M}RT,$$

где p – давление воздуха, 10^5 Па; $V = 4/3\pi R_{\text{сп}}^3$ – объём светящегося КСО, $R_{\text{сп}}$ – его радиус, $m \approx 4/3\pi r^3 \times 9,16 \times 10^3$ кг/м³ – масса металлического ядра, его плотность $\rho = 9,16 \times 10^3$ кг/м³ (плотность припоя), размер ядра из припоя $r = 5 \times 10^{-3}$ м, $M \approx 171,8$ кг/моль – молярная масса припоя, $R = 8,31 \times 10^3$ Дж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная, T – температура ядра. Используя тот факт, что ядро прожигало бумагу, подставляя для оценок $T \approx 1000$ К, получим, что радиус КСО составлял около 8,2 мм, а при $T \approx 600$ К около 6,9 мм, или диаметр светящегося КСО был порядка 1,5 мм, что близко к наблюдаемому диаметру КСО. В данном эксперименте обнаружить КСО с неразрушенной оболочкой не удалось. Полученные результаты по величине ядра и видимого диаметра КСО позволяют сделать некоторые выводы относительно структуры КСО. Это светящийся объект представляет собой металлическую паровую область в оболочке. Вывод подтверждает гипотезу [10] о том, что плазменные образования в аналогичных экспериментах представляют собой светящиеся оболочки, наполненные паром.

Выводы

В работе проведены исследования по получению КСО в разных условиях при взаимодействии плазменной струей с металлическими образцами.

При вложенных в плазматрон энергиях порядка 300 Дж наблюдалось появление частиц КСО с толщиной оболочки порядка 12 мкм, общим диаметром до 1,5 мм, диаметром ядер порядка 5×10^{-3} м и временем жизни от 3 до 7 с. В их состав входили компоненты кислорода, углерода, железа, меди, олова и свинца.

Увеличение вложенной энергии в струю плазмы из плазматрона позволили получать

ДСО размеров приблизительно больших в 5–10 раз. Эти КСО имели характерное время жизни большее 6–7 с, в то время, как время жизни КСО в случае плазматрона с низкой энергией не превышало 3–4 с. Эти КСО также взрывались и оставляли следы взрыва на бумаге.

Долгое свечение, большое время жизни, способность прыгать, высокая плотность внутренней энергии КСО показывают, что они являются аналогами реальных шаровых молний.

Проделанные эксперименты позволяют перейти к созданию заряженных КСО, а также моделированию взаимодействия КСО с конкретными горючими газами. Такие эксперименты готовятся в настоящее время.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авраменко Р. Ф., Николаева В. И., Поскачьева Л. П. Шаровая молния в лаборатории. – М.: Химия, 1994.
2. Ершов А. П., Розанов В. В., Сысоев Н. Н., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н., Шибков В. М. Физическая гидродинамика. Вып.4. Препринт физического факультета МГУ, 1994, № 8/1994.
3. Авраменко Р. Ф., Бахтин Б. И., Николаева В. И., Поскачьева Л. П., Широков Н. Н. / Журнал Технической Физики. 1990. Т. 60. № 12. С. 73.
4. Уруцкоев Л. И., Ликсонов В. И., Циноев В. Г. / Прикладная физика. 2000. № 4. С. 83.
5. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Osokin A. A., Stepanov A. I., Stepanov I. G. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. Vol. 43. № 12. P. 4043. doi: 10.1109/TPS.2015.2478441
6. Bychkov V. L. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42. № 12. P. 3912.
7. Суздаев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: Комкнига, 2006.
8. Гречихин Л. И. Наночастицы и нанотехнологии. – Минск: ИОФ «Право и Экономика», 2008.
9. Рамбиди Н. Г., Березкин А. В. Физические и химические основы нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2008.
10. Carrey J., Radousky H. B., Berkowitz A. E. / J. Appl. Physics. 2004. Vol. 95. № 3. P. 823.
11. Шабанов Г. Д. / Успехи физических наук. 2019. Т. 189. № 31. С. 95.
12. Бычков В. Л. Естественные и искусственные шаровые молнии в атмосфере Земли. – М.: Макс Пресс, 2021.
13. Bychkov V. L., Savenkova N. P., Anpilov S. V., Troshiev Y. V. / IEEE Trans. Plasma Sci. 2012. Vol. 40. № 12. P. 3158.
14. Bychkov V. L., Anpilov S. V., Savenkova N. P., Stelmashuk V., Hoffer P. / IOP Conf. Series: J. of Phys: Conf. Series. 2018. Vol. 996. P. 012012. doi:10.1088/1742-6596/996/1/012012

The influence of a capillary plasma torch on metals

V. A. Baidak, V. L. Bychkov, D. E. Sorokovykh, D. V. Bychkov and D. N. Vaulin

Lomonosov Moscow State University
Bd. 2, 1 Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: bychvl@gmail.com

Received 14.06.2023; revised 4.09.2023; accepted 18.09.2023

Experiments were carried out on the effect of a capillary plasma torch jet on steel, copper samples and solder wires. The energy inputted in the discharge varied from 0.3 to 1.5 kJ. At the same time, when the capillary plasma torch jet interacted with metals, compact long-lived luminous formations CLF were formed. When exposed to solder, CLF with an unusually large external diameter of up to 1.5 cm, an internal diameter of up to 0.5 cm and a lifetime of up to 7 s were obtained. It consists of a core and shell and have an energy density comparable to the energy density of combustible materials.

Keywords: capillary plasma generator, jet, impact on samples, steel, copper, solder, formation of compact long-lived luminous objects.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-399-406

REFERENCES

1. Avramenko R. F., Nikolaeva V. I. and Poskacheva L. P. Ball lightning in the laboratory, Moscow, Chemistry publ. 1994. pp. 15 [in Russian].
2. Ershov A. P., Rozanov V. V., Sysoev N. N., Timofeev I. B., Chuvashov S. N. and Shibkov V. M., Physical hydrodynamics. Vol. 4. Preprint of the Faculty of Physics of Moscow State University, № 8/1994 (1994) [in Russian].
3. Avramenko R. F., Bakhtin B. I., Nikolaeva V. I., Poskacheva L. P. and Shirokov N. N., J. of Technich. Fiz. **60** (12), 73 (1990) [in Russian].
4. Urutskoev L. I., Lixonov V. I. and Tsinoev V. G., Applied Physics, № 4, 83 (2000) [in Russian].
5. Bychkov V. L., Chernikov V. A., Osokin A. A., Stepanov A. I. and Stepanov I. G., IEEE Trans. Plasma Sci. **43** (12), 4043 (2015). doi: 10.1109/TPS.2015.2478441
6. Bychkov V. L., IEEE Trans. Plasma Sci. **42** (12), 3912 (2014).
7. Suzdalev I. P., Nanotechnologies: physico-chemistry of nanoclusters, nanostructures and nanomaterials, Moscow, Komkniga Publ., 2006 [in Russian].
8. Grechikhin L. I., Nanoparticles and nanotechnologies, Minsk, IOOO "Pravo and Economics" Publ., 2008 [in Russian].
9. Rambidi N. D. and Bereskin A. S., Physical and chemical bases of nanotechnologies, Moscow, Fizmatlit Publ., 2008 [in Russian].
10. Carrey J., Radousky H. B. and Berkowitz A. E., J. Appl. Phys. **95** (3), 823 (2004).
11. Shabanov G. D., Usp. Fiz. Nauk **189** (1), 95 (2019).
12. Bychkov V. L., Natural and Artificial Ball Lightning in the Earth's Atmosphere, Springer Nature, Switzerland, 2022. doi.org/10.1007/978-3-031-07861-3
13. Bychkov V. L., Savenkova N. P., Anpilov S. V. and Troshiev Y. V., IEEE Trans. Plasma Sci. **40** (12), 3158 (2012).
14. Bychkov V. L., Anpilov S. V., Savenkova N. P., Stelmashuk V. and Hoffer P., IOP Publ IOP Conf. Series: J. of Phys: Conf. Series **996**, 012012 (2018). doi: 10.1088/1742-6596/996/1/012012