

## Некоторые объекты, возникающие при взаимодействии электрического разряда с металлом и полимером

© С.Е. Емелин, В.С. Семенов, В.Л. Бычков, Н.К. Белишева, А.П. Ковшик

Научно-исследовательский институт физики Санкт-Петербургского государственного университета, 198904 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 27 ноября 1995г.)

Развит экспериментальный подход к созданию автономных объектов, похожих на шаровую молнию, путем зарядки энергоемкой метастабильной плазмой активированной основы, в качестве которой используются полимеры и металлы. Описаны способы получения и свойства ряда автономных объектов, которые с ростом параметров, отражающих характеристики энерговложения, увеличивают свое сходство с шаровой молнией. Предпринята попытка указать конкретные формы зарядки и дать краткую феноменологическую трактовку процессов, приводящих к наблюдаемым эффектам.

### Введение

Существование шаровой молнии вместе с рядом свойств, вызывающих значительный интерес, установлено достаточно надежно, и все же ясность в понимании ее физической природы пока отсутствует. К настоящему времени имеется целый ряд гипотез относительно природы шаровой молнии и много способов получения объектов, напоминающих ее. Однако только две-три гипотезы могут в большой мере отразить свойства реального явления и лишь несколько способов позволяют получить объекты, отражающие существенные его характеристики.

Среди гипотез, достаточно правдоподобно описывающих обстоятельства возникновения шаровой молнии и условия ее существования, наибольшее внимание привлекает плазменно-экситонная гипотеза. Под экситоном понимается электронно-возбужденное состояние ионов, атомов, молекул, а также кластеров и аэрозольно-гелевых агрегатов. Плазменная сторона гипотезы указывает на существенную роль ионов, электронов и соответствующей им динамики как в зарождении, так и в течение периода существования феномена. Первичное указание экситонной природы шаровой молнии содержится в [1].

Среди лабораторных методов, позволяющих получать регулярным образом объекты, приближающиеся по свойствам к естественно возникающим, можно выделить образования, инициированные электрическим эрозионным разрядом. Комплекс условий и процессы коллективного характера, сопровождающие появление эрозионной плазмы, ее сверхвозбуждение, агрегацию, дезактивацию и взаимодействие со средой адекватно представляются в рамках плазменно-экситонной гипотезы.

Примером объектов такого рода может служить энергоемкое плазменное образование (ЭПО), инициируемое электрическим разрядом в канале с испаряющимися стенками [2], обладающее интересным набором характеристик. Высокая плотность энергии

в ЭПО ( $10\text{--}100\text{ Дж/см}^3$ ) сочетается с низкими газовой ( $T_g \sim 1000\text{ К}$ ) и электронной ( $T_e \sim 0.5\text{ эВ}$ ) температурами, высокой электронной концентрацией ( $n_e \sim 10^{17}\text{ см}^{-3}$ ), а время жизни ( $\tau \sim 2\text{ мс}$ ) на два-три порядка превышает время самостоятельного существования идеальной плазмы. Струя ЭПС имеет сложную внутреннюю структуру, состоящую из оболочки и ядра, причем перемещение последнего в атмосфере со скоростью порядка  $200\text{ м/с}$  не сопровождается разрушением его границ. Взаимодействие быстро движущегося ядра с металлом и ферритом связано с интенсивным энерговыделением и возникновением больших разрушений мишени, в то время как воздействие на диэлектрик ограничивается тонким поверхностным слоем. Исследование физических условий образования [3] указывает на наличие высокой концентрации сильновозбужденных атомов, что вместе с малостью температуры повышает эффективность обменного взаимодействия [4].

Естественно было бы предположить, что дальнейшее продвижение в области эксперимента должно быть связано с усилением требований к величине удельного энерговложения и неравновесности разряда. В то же время метастабильность конденсированного состояния сильно возбужденных атомов достигается лишь при значительном разделении областей электронной плотности и ионных остовов. Одновременное увеличение эффективности обменного взаимодействия и уменьшение плотности ридберговского вещества, необходимое для достижения метастабильности, может быть получено при возрастании заряда ионов атомов [3] и использования тяжелых атомов как легче ионизируемых.

Представляется также полезным и наличие полимерной сетки как заряжаемой и поляризуемой ионами основы [5], дополнительное стабилизирующее действие которой должно снизить высокие требования, налагаемые как на величину заряда ионов, так и на электрический разряд с точки зрения его неравновесности. Идея электрического зарядки,

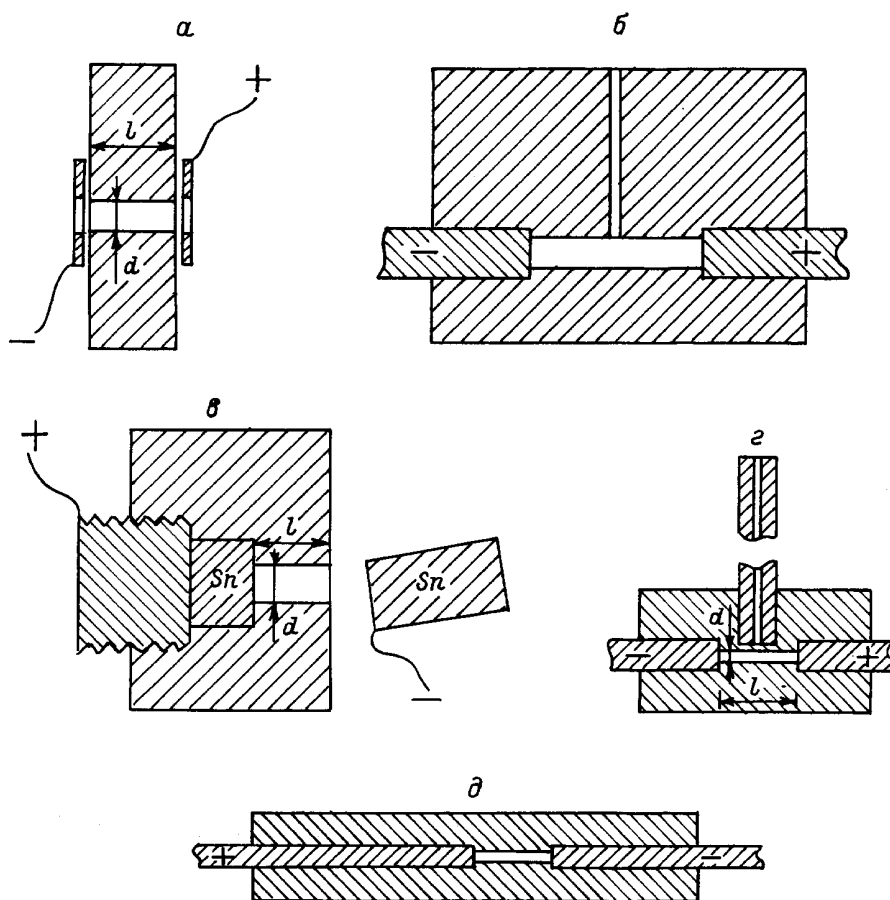


Рис. 1. Конструкции разрядников. *a* — симметричный открытый, *б* — *T*-образный, *в* — несимметричный открытый, *г* — *T*-образный с дросселем, *д* — закрытый; *l* — длина, *d* — диаметр канала.

предложенная в [5], предоставляет весьма существенную дополнительную возможность для достижения поставленной цели, так как в этом случае достаточно энергетичные возбуждения могут создаваться и в относительно "горячем" разряде, что, безусловно, облегчает их получение, а затем, поскольку они введены в холодную основу, инициировать образование метастабильного вещества.

С помощью способа, основанного на идее электрического заряжения с учетом необходимости усиления изложенных выше требований, мы попытались воспроизвести условия возникновения шаровой молнии при замыканиях в электросети. В данной работе приводятся результаты экспериментов, сопровождавшихся появлением ряда объектов при энерговыделении, осуществлявшемся в электрическом разряде.

## 1. Энергетические характеристики эрозионной плазмы

В качестве источника возбуждений для электрического заряжения была выбрана эрозионная плазма. Предварительными исследованиями было установле-

но, что эрозионная плазма капиллярного разряда [2] имеет высокую среднюю удельную энергию атомов  $W_{at}$ , в основном изменяющуюся в диапазоне от 5 до 100 эВ/атом в зависимости от режима разряда и конструкции разрядника, при времени существования от сотен микросекунд до сотен миллисекунд.

При условии превышения времени жизни эрозионной плазмы над временем прохождения ее по каналу энергия на выходе близка к вкладываемой, которая и измерялась при исследованиях. Нижняя оценка вложенной энергии по отношению ко вкладываемой может быть найдена по тепловыделению на металлической мишени, она составляет более 60%. Увеличение напряжения приводит к росту температуры и уменьшению времени жизни плазмы, в связи с чем КПД энерговыделения снижается. Верхняя граница диапазона высокого КПД может быть найдена по уменьшению прожигания мишени. Для симметричного открытого разрядника (рис. 1, *a*) из полиметилметакрилата зависимость  $W_{at}$  от начального напряжения  $U_0$  накопителя ( $C = 800$  мкФ, дроссель  $L = 8$  мГн) приведена на рис. 2.

Средняя удельная энергия пропорциональна напряжению, растет с увеличением диаметра и умень-

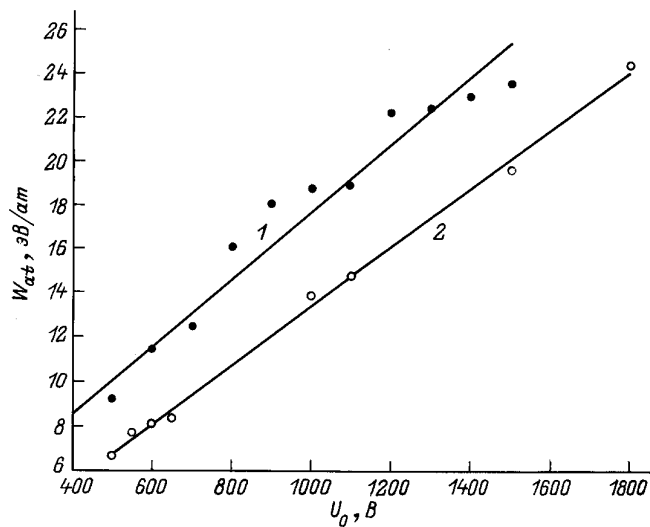


Рис. 2. Зависимость средней удельной энергии от начального напряжения накопителя. Размеры канала, мм: 1 —  $6 \times 1,5$ , 2 —  $6 \times 0,6$ .

шением длины канала, слабее с увеличением плотности тока в нем, а также атомного номера элементов, слагающих диэлектрик. Плазма и разряд сильно неравновесны:  $W_{at}/W_T$  около 100 и более. Доля энергии, приходящаяся на излучение, мала  $\sim 1\%$  [2].

В отношении равномерности распределения удельной энергии по атомам можно отметить следующее. Ввиду увеличения поляризуемости атомов с ростом их возбуждения [6], а также сложного состава неидеальной плазмы (атомы, ионы, кластеры, частички) процесс равномерного возбуждения представляется маловероятным. Это особенно существенно в наиболее неравновесных режимах, где за счет развития, например, токовой неустойчивости в разряде вблизи обрыва тока возможно появление волн возбуждения [3]. По-видимому, под влиянием коллективных процессов, одной из форм которых являются плазменные волны, происходит радиальное расслоение плазмы в канале с числом трубок тока от одной при поперечном режиме разряда до 10–20 при продольном режиме [3]. Усиление неравновесности разряда вблизи обрыва тока [3,7] при высокой плотности энерговыклада может повысить вероятность процессов коллективного излучения и благодаря нелинейному характеру взаимодействия электромагнитного поля с веществом [8] привести к образованию сгустков возбуждения с повышенной удельной энергией. Кроме того, при наличии в плазме значительного количества водорода, атомы которого составляют более половины их общего числа в полиметилметакрилате и могущего принять лишь примерно не более 13,6 эВ, удельная энергия других атомов — углерода, кислорода и особенно атомов металла электрода, например олова, может значительно превышать среднее значение.

## 2. Структура на основе углеводородного полимера

Согласно [5], один из вариантов метастабильного вещества с низкой плотностью и высоким энергосодержанием представляет собой заряженную полимерно-фрактальную структуру, а возможным способом ее получения является зарядка ионами пористой структуры. С целью проверки этих выводов теории был предпринят эксперимент по взаимодействию эрозионной плазмы с объектами с сильно развитой поверхностью.

В разрядник, конструкция которого представлена на рис. 1, б, помещались крупинки активированного угля, графита или скатанные кусочки хлопковой ваты. Разряд с энергией порядка 1–3 кДж приводит к выбросу большей части содержимого капилляра в неизменном виде, а также к появлению одного или нескольких автономных образований (АО). Последние вылетают на высоту 0,5–1,5 м и падают наподобие снежинок со свечением красного цвета, имеют неправильную форму и размер до 5–6 мм. В первый момент после вылета происходит заметное уменьшение размеров и яркости свечения АО. Время свечения до 5 с, перед погасанием оно локализуется в центральной области. Следов дыма не наблюдается. Попадание в вату приводит к ее воспламенению.

Остатки АО имеют желтовато-белую очень пористую структуру, сходную для всех типов заряжаемой основы, содержащую иногда короткие пучки волокон или отдельные более длинные волокна. Следы обугливания полностью отсутствуют, плотность около  $50 \text{ мг/см}^3$ . Образования после значительной деформации — сжатия, растяжения восстанавливают свою форму, проявляя сверхэластичность, что присуще лишь полимерам. В неоптимальных режимах разряда могут образовываться частички, состоящие наполовину из активированного угля и лишь наполовину из полимера, эластичность которого в этом случае значительно ниже.

Фактически происходят сорбция плазмы и восстановление полимера из активированного угля, что является прямым подтверждением возможности электрического заряжения, предложенного в [5].

## 3. Автономные объекты, возникающие при взаимодействии плазмы с металлом

Интересные объекты возникают при взаимодействии струи эрозионной плазмы с легкоплавкими металлами. Для их получения использовался несимметричный разрядник (рис. 1, в) из полиметилметакрилата, размеры которого вместе с параметрами разрядной цепи и режима разряда были изменены с целью увеличения средней удельной энергии. Длина

канала  $l = 3-5$  мм, диаметр  $d = 2-5$  мм, дроссель  $L = 0.5$  мГн, характеристическое сопротивление разрядной цепи  $R_x = (L/C)^{1/2} = 0.8$  Ом. В непосредственной близости к выходному отверстию разрядника располагался цилиндр диаметром 8 мм из олова.

При начальных напряжениях накопителя  $U_0 = 800-1500$  В средняя удельная энергия  $W_{at} \sim 20-35$  эВ/атом, а с учетом относительного количества атомов водорода (13.6 эВ/атом) уровень возбуждения тяжелых атомов может превышать 60 эВ/атом. Этой энергии достаточно для получения 2-3 зарядных ионов углерода и кислорода, а также 3-4 зарядных ионов металла электрода (олова).

При разряде эрозионная струя "прожигает" в олове желобок, иногда с периодическими изменениями ширины и глубины наподобие гофрированной трубки, из которого в боковом направлении отлетают ярко светящиеся желто-красным цветом шарики диаметром около 1-2 мм или менее (рис. 3).

Падение их на горизонтальную твердую поверхность приводит к подскокам до 50 раз на высоту до нескольких сантиметров, сопровождаемым постепенным уменьшением высоты подскоков, а также уменьшением диаметра шариков при неизменной яркости. Заключительная часть процесса движения шарика при условии сохранения им достаточной скорости перемещения вдоль поверхности связана со скольжением, переходящим в качение, в результате которого шарик быстро останавливается. На поверхности стола после подскоков остаются следы в виде темных кругов, окруженных светлым налетом, а после скольжения дорожка аналогичной структуры. В случае деревянной поверхности под остановившимся шариком имеются следы ее обугливания.

Некоторые шарики, особенно большого размера, подсакаивают малое число раз и на небольшую высоту, при ударе могут распадаться на несколько разных по активности частей. Другие, в основном малого размера, имеют значительно большую высоту подскоков и многократно уменьшаются к концу своей активности, при этом заключительная часть траектории за счет отклонений случайного характера теряет правильную форму. Чаще всего свечение обрывается резко и на произвольном участке траектории, а остаток объекта имеет вид шарика неправильной формы размером 0.2-0.5 мм.

Остаток неактивного объекта имеет поверхность, характерную для расплавленного, а затем застывшего олова. Поверхность АО, проявлявшего значительную активность, состоит из перемежающихся участков чистого металла и участков сильно разбитой темной поверхности, на которой встречаются "веточки" и отдельные длинные тонкие волокна полимера. Остатки активной части представляют собой диэлектрическую темную структуру (рис. 4), образованную пересекающимися нитевидными формами,

поверхность которых покрыта "ковром" образований из светлого полимера.

Область свечения "оболочка", имеет две-три градации, сильно различающиеся по яркости. Диаметр ее значительно больше диаметра плотного ядра и уменьшается с ростом скорости движения АО. Падение благодаря "оболочке" заметно замедляется.

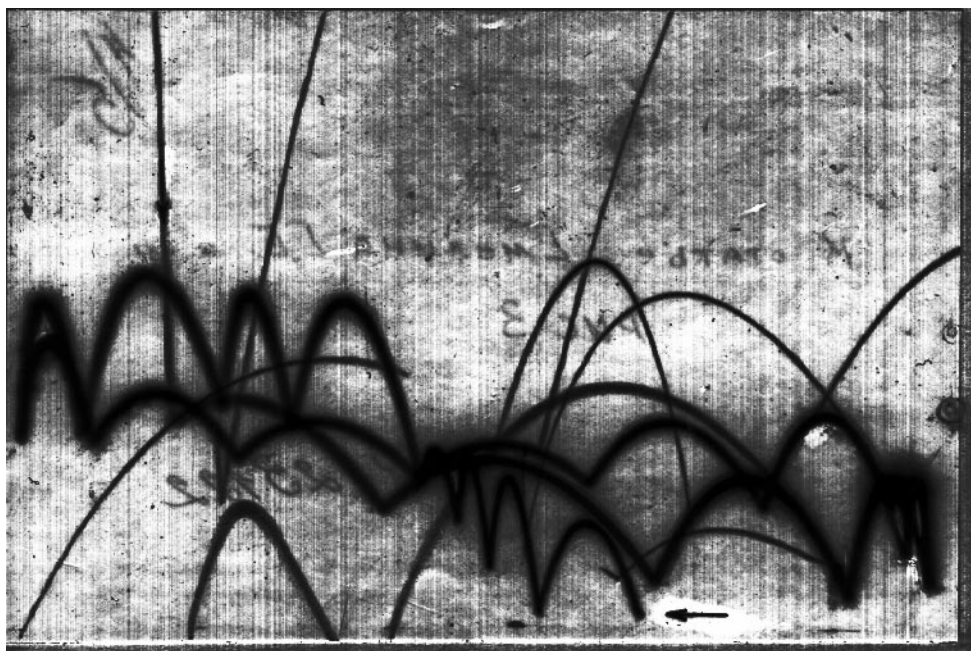
При использовании внутреннего электрода из олова, а также наиболее широкого, короткого канала и высоких напряжений указанного диапазона дымовой след летящих в воздухе АО становится нерасходящимся. Вначале это непрерывный, извивающийся и быстро уплотняющийся шнур, затем происходит разрывание его на куски длиной 3-5 см, которые сокращаются примерно до 1 см при диаметре 0.1-0.2 мм. Наблюдающаяся в течение первой минуты высокая эластичность структуры через сутки сменяется крайней хрупкостью. Под микроскопом прорелаксировавшая структура (рис. 5) имеет вид слабоплотного аэрогеля, состоящего из цепочек и сгущений темных и светлых частичек размером около 1 мк.

АО при условии образования в атмосфере могут существовать некоторое время и в жидком азоте, образуя пузырек, размывающий изображение; яркость и время свечения при этом меньше. Шарики малого размера не светятся, но некоторые из них толчками двигаются в одном направлении.

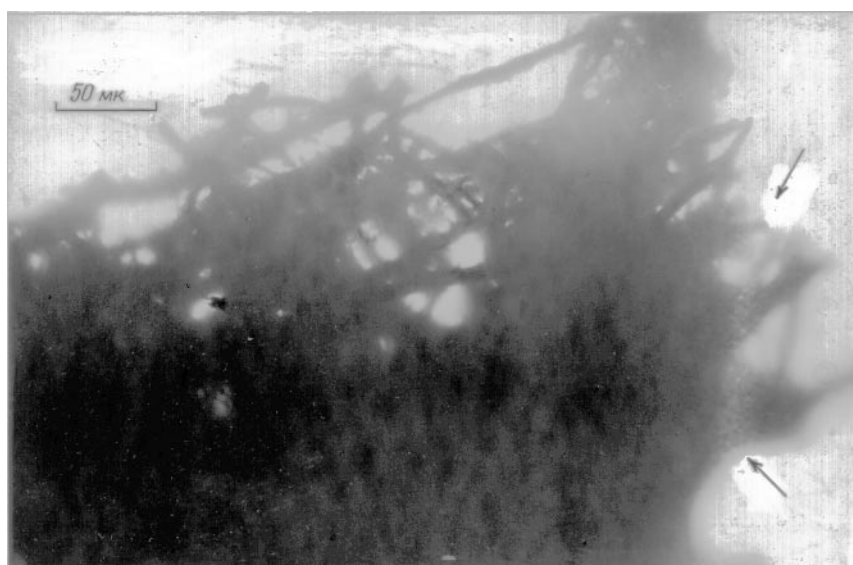
При уменьшении удельной энергии до 10-15 эВ/атом и менее появление светящихся АО не наблюдается. В случае индия кроме описанных эффектов имеет место возникновение объектов двух типов, сильно различающихся по яркости свечения. Получение АО возможно с использованием свинца при замене материала разрядника на фторопласт.

Объекты, весьма сходные с полученными нами, иногда возникают при замыкании пантографа трамвая на линию. Их также можно получить при электрическом замыкании двух кусков олова (замыкании через жидкое олово), что, по-видимому, и произошло в случае возникновения шаровой молнии на паяльнике, описанном в [9], а также по способу, использовавшемуся в разделе 2. В последнем случае металл в виде опилок загружался в разрядник. Яркое светящиеся АО на основе алюминия, лития, бария и др. имели наибольшее время существования для алюминия. В дополнение к уже отмеченным свойствам можно указать следующее.

Шарики на основе алюминия светятся значительно ярче, чем в случае олова. Маленькие и, по-видимому, случайно лучше других заряженные АО могут лететь без падения по почти горизонтальной траектории 2-3 м. Большого размера шарики диаметром 1-3 мм падают слегка замедленно; иногда спустя несколько секунд после падения и прекращения основной активности они неожиданно выбрасывают узкую эрозионную струю или подсакаивают. При выбросе в форвакуум полностью отсутствуют, образуются лишь раскаленные кусочки металла.



**Рис. 3.** Интегральное негативное изображение АО на основе олова. Стрелками указаны места выпадения объекта (слева) и прекращения активности после 20 подскоков.

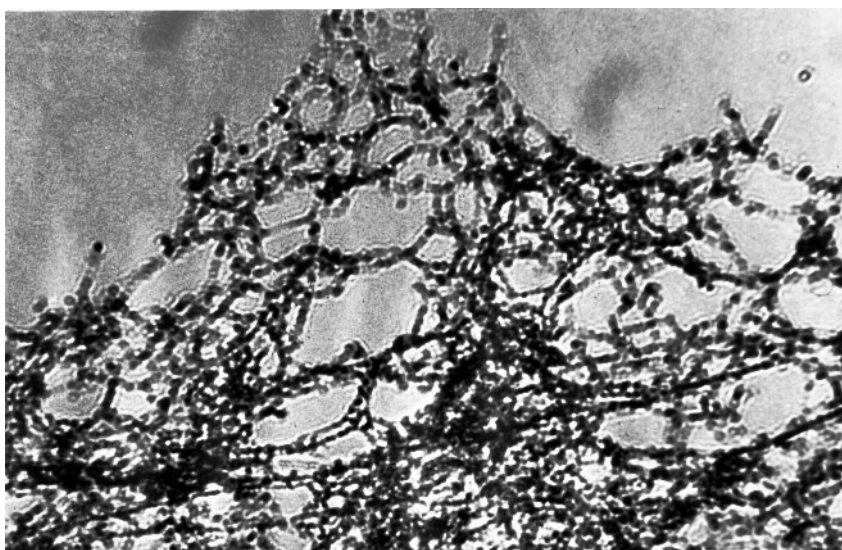


**Рис. 4.** Структура остатков активной части ядра АО на основе олова. Стрелками указаны участки изображения, выявляющие наличие поверхностного слоя образований из светлого полимера.

В случае стали, титана наблюдаются эффекты, усиливающие сходство данного явления с "искрами", вылетающими из под точильного камня. Например, шарики из стали, пролетев без искр в высоту около метра при замедлении движения с хлопком взрываются, а сотни разлетающихся осколков образуют шаровой объем диаметром 10 см и более.

Под воздействием разряда на поверхности торцевого электрода, находящейся внутри канала, наблюда-

ется ряд явлений, которые не могут быть объяснены лишь нагревом и плавлением металла. Их условно можно разделить на три типа: 1) нарушения формы поверхности, связанные с ее оплавлением, испарением и уносом части металла; 2) деформации отдельных областей поверхности, связанные с распуханием металла, образованием наростов и шариков, прикрепленных к наростам или выбрасываемых наружу; 3) образование тонких каналов.



**Рис. 5.** Структура остатков "дымового" следа АО, представленного на рис. 3 (диаметр темных и светлых шариков  $\sim 1$  мк).

Явления первого типа особенно ярко выражены при больших плотностях тока и энергиях разряда, низких температурах плавления материала электрода и имеют естественное объяснение.

Распухание металла является наиболее слабым из эффектов, отнесенных ко второму типу. Оплавление при этом возникает лишь как сопутствующий фактор и может быть небольшим или почти отсутствовать. Изменения формы имеют вид отдельных бугорков или "пузырей", возникающих в случайном месте, или обширного вздутия, высота которого растет к центру электрода. Сравнение твердости, производимое укалыванием иглой, выявило, например, в случае алюминия и меди заметное уменьшение ее при распухании. "Пузыри" из меди имеют правильную сферическую форму и однородную, нетронутую окислением поверхность, так что через микроскоп на ней можно увидеть неискаженное отражение предметов, удаленных на несколько метров.

Наросты имеют столбообразную форму и образованы большим числом слоев, как если бы металл вытекал из канала на оси нароста и, растекаясь по его вершине, резко застывал, образуя новый слой и увеличивая высоту образования.

Шарики имеют размер от десятых долей до 1–2 мм, правильную форму, чистую металлическую поверхность, матовую для алюминия, блестящую для меди; твердость металла также понижена.

Сравнивая результаты воздействия разряда на электрод при последовательном увеличении напряжения, удается проследить отдельные стадии явления: вначале образуется нарост, затем "пузырь", который, увеличиваясь, принимает шаровую форму и выбрасывается наружу.

В капиллярном разряде при использовании внутреннего электрода из стали, алюминия, латуни при энергиях порядка 1 кДж и более иногда наблюдается кроме плазменной струи вылет небольших светящихся АО размером около 1 мм и менее. По интегральному цветному изображению обнаруживается модуляция яркости свечения со значительной глубиной и непериодическим законом изменения. Некоторые АО непосредственно после выхода из канала начинают двигаться в случайном направлении по сложной траектории. Это неярко светящийся желтым цветом при постоянной для глаза яркости шарик с четкой сферической границей диаметром 1–1.5 мм, беззвучно исчезающий примерно через 1 с после появления.

С возникновением таких АО коррелируется образование на торцовом электроде тонких, диаметром порядка 30 мк, каналов с выходным отверстием правильной круглой формы, на котором могут быть следы почернения. Сравнение объема АО с количеством выброшенного металла указывает на низкую плотность его вещества, которая лишь в 5–10 раз превышает плотность воздуха.

#### 4. Увеличение плотности энерговложения

С целью приближения к режиму конденсации плазмы конструкция разрядника (рис. 1 г) и режим разряда были принципиально изменены в соответствии с усилением требований, изложенных во Введении. Для увеличения плотности энерговложения был предотвращен свободный выход плазмы из канала с помощью установки на выходном отверстии дросселирующего отрезка стеклянного капилляра диаметром

0.8 мм длиной 100 мм. Связанное с этим возрастание плотности плазмы способствует увеличению энергии плазмонов.

Были также предприняты меры по уменьшению утечки энергии в форме плазменных волн, которые за счет отрыва электронной температуры от газовой могут быть распространяющимися. Истечение их вдоль направления электрического поля по плазме керна наружу приводит к нецелесообразной потере энергии, тратящейся на поддержание керна во внешней части струи открытого плазмогенератора. Поэтому канал с обеих сторон был заглушен торцовыми электродами, а выходное отверстие сделано в середине канала в боковом направлении.

Для повышения неравновесности разряда он осуществлялся в режиме, близком к обрыву тока [3,7], а ограничительное сопротивление ( $R = 100 \text{ Ом}$  при индуктивности дросселя  $L = 2.3 \text{ мГн}$ ) выбиралось наибольшим из тех, при которых дросселирование было достаточно эффективно.

Разряд в канале  $6 \times 1 \text{ мм}$  с начальным напряжением 1.7–1.8 кВ и напряжением обрыва тока 1.4 кВ имеет плотность энерговложения в объем разрядника около  $50 \text{ кДж/см}^3$ .

При разряде перемещение плазмы по стеклянному капилляру, сопровождаемое оплавлением его внутренней поверхности и свечением, происходит лишь на 2–3 см. Из капилляра беззвучно со скоростью порядка 5 м/с вылетают ярко светящиеся желто-красным цветом АО размером около 0.2 мм с длиной светящегося участка траектории 10–40 см. Количество АО, их размер и скорость резко возрастают с увеличением напряжения; при разряде на пределе прочности стеклянного капилляра ( $U_0 = 1.8 \text{ кВ}$ ) их число достигает нескольких десятков.

Попадание некоторых из АО на медную фольгу толщиной 30 мк, располагавшуюся нормально к капилляру на расстоянии 1–2 см от него, приводило к возникновению эрозионной вспышки и образованию отверстия диаметром 100–200 мк с оплавленными краями. В случае непроплавания фольги возникало круглое пятно оплавления диаметром 0.2–0.4 мм с четкой границей, внутри которого было множество проплавлений околOMICронного размера. Область оплавления концентрически окружена областью более слабого воздействия с четкой границей диаметром 1–1.5 мм и покрыта "пушистым" зелено-голубым слоем, легко скатываемым иглой в такой же шарик. В случае алюминиевой фольги эрозионная вспышка особенно яркая и при наблюдении в плотный серый фильтр имела вид узкого голубого конуса длиной 2–3 см. Заметим, что предполагаемый диаметр АО лишь в 5 раз больше толщины мишени. Считая энергию взаимодействия связанной лишь с нагревом и плавлением меди, а диаметр АО равным диаметру отверстия в фольге, получаем сильно заниженную оценку плотности энергии  $W > 300 \text{ Дж/см}^3$ .

При расположении стеклянного капилляра вдоль оси канала в качестве его продолжения образуются светящиеся АО на основе неправильной формы черных диэлектрических частичек диаметром 10–100 мк, попадание которых на алюминиевую фольгу толщиной 10 мк оказывает лишь механическое воздействие.

С точки зрения минимизации потерь энергии разряда закрытый разрядник представляется оптимальным. При этом, однако, возникает затруднение с выпуском АО наружу, которое удается разрешить путем самопроизвольного разрушения разрядника на стадии готовности объекта за счет проплавления им диэлектрической или металлической стенки канала. Последнее связано с потерей АО некоторой доли энергии и с необходимостью сочетания значительного числа параметров, ввиду чего появление одиночных относительно больших объектов наблюдалось лишь несколько раз.

Один из вариантов конструкции разрядника закрытого типа представлял собой (рис. 1, *д*) полиэтиленовую трубку сечением  $8 \times 1.5 \text{ мм}$  с завинченными в нее стержнями-электродами из стали с резьбой 2 мм. Длина канала, образованного зазором между торцами электродов, составляла 4–6 мм, начальное напряжение около 1.8 кВ, напряжение обрыва тока 1–1.2 кВ, ограничительное сопротивление 100 Ом, индуктивность дросселя  $L = 2.3 \text{ мГн}$ , энергия разряда около 0.9 кДж, плотность энерговложения в объем канала около  $85 \text{ кДж/см}^3$ . При выборе конструкции разрядника и режима разряда мы ориентировались на условия возникновения шаровой молнии при замыканиях в силовых сетях и электроустановках [10].

При удачном разряде на первой стадии происходит деструкция полимера, а образующиеся газы с дросселированием выходят через щели между электродом и трубкой. Затем расплавленный полиэтилен обтекает электроды, герметизируя разрядный объем. Разряд переходит в следующую фазу, и эрозионная плазма, образующаяся при повышенном давлении, взаимодействует с активированным для зарядки полимером и металлом. Окончание зарядки связано с резким дополнительным возрастанием давления, что при небольшой индуктивности дросселя приводит к быстрому обрыву тока. Образуется АО, который проплавляет отверстие в боковой стенке канала и почти беззвучно вытекает через него. Отверстие со стороны канала имеет вид щели, постепенно переходящей в маленькое гантелеобразное отверстие длиной около 1 мм на наружной поверхности. Образуется ярко светящийся желтый шарик диаметром менее 10 мм, летящий вначале горизонтально со скоростью несколько метров в секунду и менее.

Один из таких АО диаметром 6–7 мм пролетев около 2 м в падении на деревянную стену взорвался, оставив на ней следы сажи в виде сектора, направленного расширением вниз. Звук взрыва имел характер громкого щелчка высокого тона.

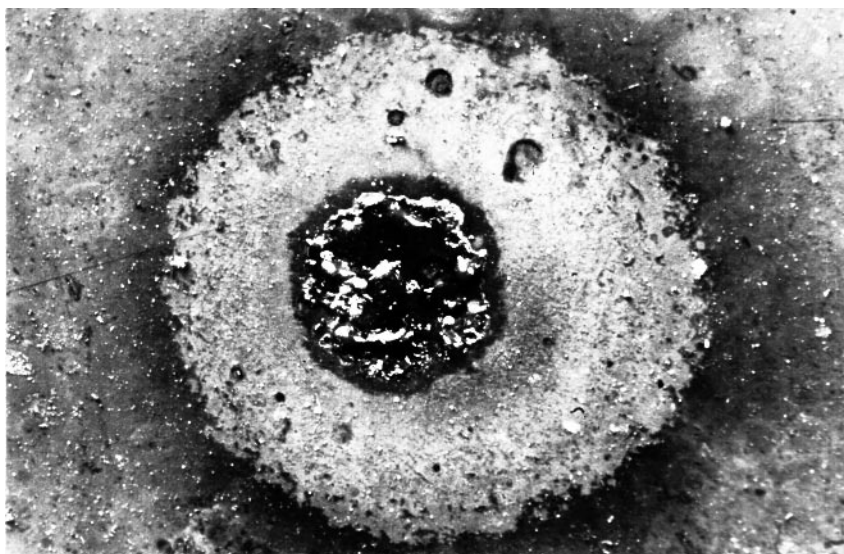


Рис. 6. Оплавленный след на стальной окрашенной вертикальной стенке прибора.

В другом случае разряд происходил в два приема с самопроизвольной задержкой на полсекунды на напряжении 1.5 кВ. При первом приеме вылетело 3 АО разных размеров, которые, двигаясь горизонтально, обогнули катушку дросселя и беззвучно исчезли на стальной окрашенной стенке прибора. В результате второго приема вылетело множество мелких АО, попавших туда же. После первого приема, по-видимому, произошло заплывание образовавшегося отверстия, что неоднократно наблюдалось.

След наибольшего АО на стенке прибора (рис. 6) представляет собой круглое пятно оплавления с четкой границей диаметром 3 мм, окруженное тонкой каймой темного налета, "оболочки" с четкой границей диаметром 9 мм, где на краске имеется лишь желто-серый налет, окруженный потемнением спадающей плотности и внешней областью слабого светлого налета с размытой границей, которая для другого АО, подходившего к стенке под косым углом, сильно вытянута в одну сторону наподобие факела. В последнем случае пятно оплавления имеет вид эллипса. Аналогичная структура следа, содержащая оплавление, наблюдалась и при диаметре "оболочки" порядка 1 мм.

## 5. Обсуждение результатов

Общей главной особенностью описанных объектов, создаваемых электрическим разрядом, является наличие неравновесного энерговложения в вещество и метастабильность возникающих состояний, которые проявляют себя различными формами активности. Усиление этих проявлений от распухания металла до его "прожигания" связано с ростом удельной энергии

вносимых возбуждений и снижением плотности полученного вещества.

Образование наростов, пузырей и шариков на электроде, являясь формой радиационного эффекта, по-видимому, связано в основном с воздействием на поверхность металла плазменных и электромагнитных квантов. Оно может характеризоваться, с одной стороны, энерговкладом с высокой плотностью, определяющейся большими плотностями токов в электродных пятнах [6], а с другой стороны, быстрым охлаждением соседними объемами металла, возможным ввиду его высокой теплопроводности, или перемещением возбуждений в более холодные области, что способствует появлению электронно-возбужденных метастабильных состояний. При достаточной величине возбуждения и за счет локализации его на отдельных электронных подструктурах [11] групп атомов происходят накопление вакансий и изменение фазового состояния [12], сопровождающееся понижением плотности металла и появлением реологических свойств при относительно низких температурах, что вызывает вытекание металла и образование шариков. Появление достаточной концентрации вакансий, обуславливающих текучесть, может быть связано с нестационарностью возбужденного состояния. Прорелаксировавшая структура должна содержать большое число микропор, что объясняет понижение твердости металла шарика.

Если в случае металла неравновесные процессы могут быть лишь одним из возможных механизмов текучести, то в случае углерода такое объяснение существенно более вероятно. На появление же в дуговом разряде шариков "расплавленного" углерода указывалось еще Лебом [13].

Наблюдающаяся динамика метастабильного состояния, проявляющаяся в возникновении каналов те-



кущего металла и шариков, по нашему мнению, свидетельствует о тенденции неравновесных нестационарных возбуждений как к микроскопической, так и макроскопической их локализации. Данные объекты интересны прежде всего как простейшие образования, создаваемые эрозийным разрядом и выявляющие формы неравновесной нелинейной активности.

Стремление АО к сферической форме и ее устойчивость, структурные свойства остатков и следов свидетельствуют о наличии сил сцепления между частицами вещества, характерных для конденсированного состояния.

В коротком и широком капилляре испарения диэлектрика не могут играть столь же существенную роль, как в узком и длинном капилляре, поэтому ситуация несколько трансформируется в сторону разряда между двумя металлическими электродами. Учитывая малую длительность импульса ( $\sim 1$  мс), катод не успевает нагреться целиком до высокой температуры, а это приводит к возникновению на нем концентрированных токовых центров — катодных пятен [6]. Эрозийная плазма над ними имеет параметры, близкие к параметрам плазмы [2]:  $n_e \sim 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e \sim 1-2$  эВ, плотность и степень ионизации низкотемпературной плазмы катодного пятна весьма высоки [6].

Эти данные, а также возможность получения объектов типа "скачущих шариков" даже при непосредственном замыкании двух кусков олова, указывают на принципиальную роль энергичных электронных возбуждений в образовании АО.

Взаимодействие плазмы с металлической поверхностью может осуществляться в различных формах: передача электронного возбуждения посредством плазменных волн и электромагнитных квантов, диффузия возбужденных атомов, перемешивание плазмы с расплавленным металлом, конденсация ЭП при охлаждении на поверхности металла и др.

Эффективность плазмонного механизма понижена в связи с большой энергией плазмонов металла (5–25 эВ) и различием электронных концентраций в плазме ( $10^{17}-10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) и в металле ( $10^{23} \text{ см}^{-3}$ ). Повышению его эффективности способствует увеличение плотности плазмы в закрытом и  $T$ -образном разрядниках, возможность возбуждения волн решетки и образования относительно низкоэнергетических возбуждений — экситонов, а также плавление металла. Ближний порядок, характерный для жидкости, приводит к частичному разупорядочению микроструктуры, и связанное с этим менее жесткое выполнение условий, определяющих границы энергетических зон, может заметно увеличить вероятность поглощения металлом низкоэнергетических плазмонов. Уменьшение плотности металла и его плавление, происходящие при зарядении, должны содействовать развитию этого процесса, благодаря чему он может приобрести характер неустойчивости.

Проникновение в металл эрозийной плазмы можно рассмотреть с помощью аналогичных явлений, происходящих при нанесении покрытий плазмой. В [14] указывается, что диффузия атомов через поверхность металла может иметь как поверхностный, так и объемный характер. Хотя расчеты дают оценки зоны диффузии порядка  $10^{-2}$  мк, реально наблюдаются переходные слои в 1–10 мк, увеличению которых способствуют повышение температуры и активность механического воздействия удара напыляемых частиц. В последнем случае возникает аномальное ускорение массопереноса, и диффундирующий элемент за время  $10^{-2}-10^{-5}$  с проходит на глубину в десятки микрон.

В нашем случае в связи с большой энергией электронного возбуждения атомов можно ожидать возникновения активной диффузии, дополнительно усиливаемой подогревом металла при частичной рекомбинации проникающих возбуждений и действием плазменных волн. Перемешивание плазмы с жидким металлом, вызываемое турбулизацией пограничного слоя, приводит к увеличению эффективной поверхности взаимодействия и облегчает процесс взаимопроникновения компонентов.

Из приведенного рассмотрения видно, что плавление металла является положительным фактором для вовлечения его во взаимодействие с плазмой. Это объясняет ослабление эффектов при использовании тугоплавких металлов.

Проникновение ионов в металл при контакте плазмы с торцовым электродом может иметь общие черты с явлением, возникающим в униполярных дугах при пробое пристеночной разности потенциалов [15] и приводящим обычно к разрушению материала стенки. В нашем случае ввиду значительно (в 10–100 раз) меньшей электронной температуры кинетическая энергия проникающих ионов может не превысить адсорбционный порог, так что объем металла, находящийся под катодным пятном, насыщается ионами, а затем выбрасывается с образованием АО и тонкого канала на электроде.

С учетом особой эффективности неравновесного взаимодействия эрозийной плазмы именно с расплавленным металлом возникает предположение о существенности роли ближнего порядка, характерного для жидкости в процессе формирования ионами структуры в металлической жидкости. Развивая его, можно также предположить, что границы текущего порядка в ней являются для ионов виртуальными вакансиями. Сильно возбужденные атомы обладая повышенной химической активностью, активизируют появление необходимой вакансии и заполняют ее. Этот процесс представляется аналогичным зарядению полимерной структуры [5], которая под влиянием электрического взаимодействия отрицательно заряженных субцепей растягивается, уменьшая свою

плотность. Связанные таким образом или растворенные сильно возбужденные атомы или же сольватированные многозарядные ионы, а также создаваемые ими возбуждения движутся в сторону охлаждаемой поверхности, где в результате увеличения их концентрации образуется поверхностный активный слой. При рекомбинации в этом слое, дополнительно усиливаемой близостью поверхности, большой плотностью вещества, насыщенного возбуждениями и процессом горения, часть энергии передается атомам металла, инициируя переход в менее плотное фазовое состояние — аэрогель.

Развиваемое при падении АО ударное давление приводит к возникновению ударных волн, движущихся в поверхностном слое, как в активной среде. Резкая активизация ими рекомбинации сопровождается взрывообразным ускорением образования аэрогеля и повышением доли энергии, выделяемой в виде тепла, что приводит к подскоку шарика.

Так же как и в случае "точильных искр", где концентрирующиеся на поверхности возбуждения могут создаваться за счет начального механического воздействия, соседства относительно холодной поверхности с горячей сердцевиной, а также в результате неравновесной химической реакции горения, инициируемой рекомбинацией этих возбуждений наличие низкого темпа и неравновесных форм рекомбинации принципиально связано с охлаждением потоком воздуха. При ослаблении охлаждения или в результате достижения критической концентрации возбуждений возможен "взрыв поверхности" или ее частей. В нашем случае за счет атомов с высокой удельной энергией и больших размеров шариков эффект значительно сильнее.

Подводя итоги, основные свойства полученных нами АО можно представить в виде следующей краткой схемы. Энергоёмкие долгоживущие АО, по свойствам близкие к шаровой молнии, имеют фрактально-полимерную структуру, образованную энергичными и организующими центрами, по энергии эквивалентными многозарядным ионам, и поляризуемой основы. АО состоят из двух основных частей: более плотного, хранящего энергию "ядра", плотность и темп рекомбинации которого уменьшаются с ростом удельной энергии, и "оболочки", вещество которой непрерывно образуется при горении в виде множества малых эрозионно-рекомбинационных струй при неравновесном фазовом переходе из вещества "ядра". Этот переход в форме волны, движущейся с затуханием и уменьшением размера от более активной поверхности в глубь "ядра" и образующей кратер, связан с передачей энергии от центров возбуждения основе. Вещество "оболочки" обладает низкой плотностью и представляет собой нестационарный фрактальный полиэксимер, рекомбинация которого инициирует люминесценцию и протекание неравновесной химической реакции с газами атмосферы с рядом

градаций снижающейся интенсивности и яркости свечения. Первые и наиболее ярко светящиеся области имеют четкую сферическую границу и определяют наблюдаемые размер и форму АО.

Образование АО происходит из энергоёмкой сильно-неравновесной плазмы при зарядке ею активированной разрядом основы — диэлектрика и металла [5]. Повышению эффективности этого процесса способствует увеличение энергии возбуждений эквивалентных ионам с зарядом 3–4 и более, достигаемое при плотностях энергозложения в объем разрядника около  $10^5$  Дж/см<sup>3</sup>, высокая неравновесность эрозионного разряда, связанная с относительно низкой плотностью тока и близостью режима к обрыву тока, закрытая конструкция разрядника.

## Список литературы

- [1] Манькин Э.А., Ожован М.И., Полуэктов П.П. // ЖЭТФ. 1983. Т. 84, Вып. 2. С. 442–453.
- [2] Авраменко Р.Ф., Бахтин Б.И., Поскачьева Л.П., Широков Н.Н. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 12. С. 57–64.
- [3] Емелин С.Е., Семенов В.С., Эйхвальд А.И., Хасани А.К. Шаровая молния в лаборатории. Сб. статей. М.: Химия, 1994. С. 87–95.
- [4] Кулаков А.В., Орленко Е.В., Румянцев А.А. Квантовые обменные силы в конденсированных средах. М.: Наука, 1990. 120 с.
- [5] Бычков В.Л. Об электрическом заряде полимерных структур. Препринт МИФИ. М., 1992. 16 с.
- [6] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
- [7] Русанов В.Д., Петрусев А.С., Потапкин Б.В. и др. // ДАН. 1993. Т. 332. № 3. С. 306.
- [8] Попов В.Н., Ярунин В.С. Когерентные коллективные явления в сверхпроводимости и нелинейной оптике. СПб., 1994. 292 с.
- [9] Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
- [10] Слосарев Н.М. Шаровая молния. М.: ИВТАН, 1990. С. 18–29.
- [11] Шигорин Д.Н., Валькова Г.А., Гастилович Е.А. и др. Электронно-возбужденные состояния многоатомных молекул и процессы их дезактивации. М.: Наука, 1993. 496 с.
- [12] Елотин А.В., Манушин А.В., Плаксин О.А., Степанов В.А. // ДАН. 1995. Т. 340. № 4. С. 483–485.
- [13] Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. М.; Л.: Гостехиздат, 1950. 672 с.
- [14] Кудынов В.В., Пекшев П.Ю., Белащенко В.Е. и др. Нанесение покрытий плазмой. М.: Наука, 1990. 408 с.
- [15] Войценья В.С., Гужова С.К., Титов В.И. Воздействие низкотемпературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы. М.: Энергоатомиздат, 1991. 224 с.