

## АНОМАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОГО ВОЛЬФРАМА

А.В.Батраков<sup>1)</sup>, С.А.Попов, Д.И.Проскуровский

Институт сильноточной электроники СО РАН

634055 Томск, Россия

Поступила в редакцию 11 марта 1996 г.

Обнаружено, что формирование конусов Тейлора на поверхности жидкого вольфрама на воздухе происходит при аномально слабых электрических полях. Это явление наблюдается исключительно на вольфраме и только в присутствии кислорода в окружающей атмосфере. Такая аномалия может быть обусловлена малой величиной поверхностного натяжения жидкого вольфрама в кислородсодержащей атмосфере.

PACS 47.65.+a; 47.20.Dr; 68.10.Cr; 52.80.Qj

Рассматриваемые в настоящей работе явления были обнаружены авторами случайно при изготовлении вольфрамовых шариков на торцах проволочек путем взрыва контакта двух проволочек импульсом тока в вакууме. Источник постоянного напряжения с малым внутренним сопротивлением подключался через ключ к приведенным в контакт вольфрамовым проволочкам. При срабатывании ключа через контакт протекал импульс тока амплитудой  $\sim 100$  А и длительностью  $\sim 1$  мс. В результате случайного напуска воздуха в вакуумную камеру было обнаружено, что после взрыва контакта на воздухе поверхности застывших капель покрылись коническими выступами (рис.1а). Несмотря на различие их высоты, все выступы имели идентичные углы при вершинах  $\sim 90^\circ$  и радиусы кривизны вершин  $\sim 0.5$  мкм. С целью выяснения природы данного явления нами были проведены эксперименты по электрическому взрыву вольфрамовых контактов на воздухе, в газах  $N_2$ , He, Ar, Ar(95%)+O<sub>2</sub>(5%) и в вакууме  $\leq 1$  торр. Были также проведены сравнительные эксперименты с контактами из Ta, Mo, Nb и Cu.

Схема экспериментов приведена на рис. 2. В первую очередь была проведена серия экспериментов по взрыву вольфрамовых контактов на воздухе. Две вольфрамовых иглы были приведены в соприкосновение своими вершинами, как показано на рис.3а. Включением тиристорного ключа через контакт пропускался импульс тока, приводящий к электрическому взрыву контакта. На рис.4а приведены осциллограммы тока 1 и напряжения 2 в момент взрыва. С учетом того, что радиус контактной площадки  $\sim 5$  мкм и амплитуда импульса тока 23 А, получаем амплитудное значение плотности тока  $j$ , протекающего через контакт, равное  $3 \cdot 10^{11}$  А/м<sup>2</sup>. Взрыв контакта произошел через время запаздывания  $t_0 \simeq 3$  мкс, что хорошо согласуется с расчетом по известному выражению [1]

$$t_0 \simeq \frac{\rho c}{j^2 \kappa_0} \ln \left( \frac{T_c}{T_0} \right), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала проводника,  $c$  – его теплоемкость,  $\kappa_0$  – температурный коэффициент электросопротивления,  $T_0$  – начальная температура,  $T_c$  –

<sup>1)</sup>e-mail: bat@lve.hcei.tomsk.su

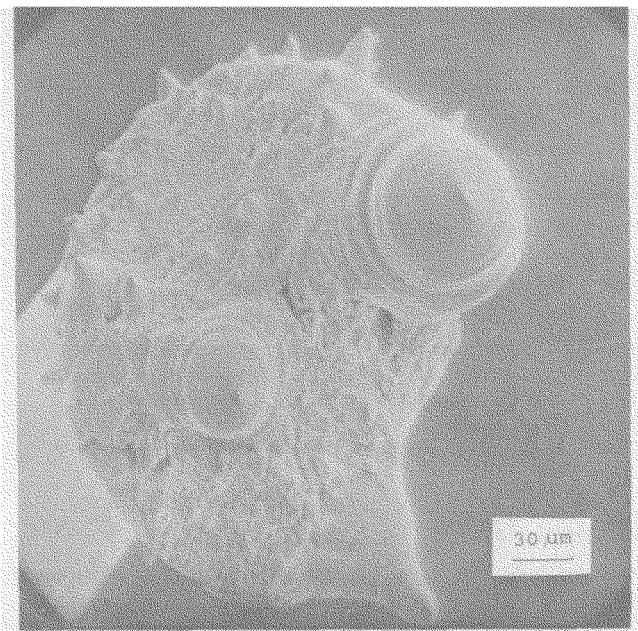


Рис.1а. РЭМ фотографии поверхности затвердевших вольфрамовых капель после электрического взрыва контактов на воздухе

критическая температура, обычно принимаемая равной температуре кипения материала. После взрыва контакта загорелась электрическая дуга, оборвавшаяся через несколько микросекунд (рис.4а). Результатом взрыва контакта явилось формирование из расплава и последующее застывание конуса Тейлора (КТ) на аноде (рис.3б). Учитывая, что в результате взрыва контакта произошел обрыв его проводимости, а накопительная емкость практически не разрядилась, можно полагать, что формирование КТ из жидкой фазы на аноде произошло до ее затвердевания в электрическом поле воздушного промежутка, образованного двумя расплавленными каплями. Заметим, что углы при вершинах формирующихся КТ больше углов при вершинах исходных игл, изготавливаемых методом электрохимического травления проволоочных образцов. Это исключает образование повторного контакта при формировании КТ после взрыва исходного контакта. Однако, если эксперимент повторить с иглами, изображенными на рис.3б, вырастающий после взрыва КТ достигает анодной капли, что приводит к повторному образованию контакта и последующему его взрыву. Этот процесс происходит циклически и заканчивается либо обрывом проводимости с образованием КТ на аноде, либо образованием контактного мостика (рис.3с) с полной разрядкой емкостного накопителя (рис.4б).

Для формирования КТ должно быть выполнено несколько условий. Прежде всего, для развития электрогидродинамической (ЭГД) неустойчивости на поверхности проводящей жидкости необходимо, чтобы давление сил электрического поля превосходило давление сил поверхностного натяжения [2]. Это условие выполняется, если

$$2\gamma/r \leq \epsilon_0 E_0^2/2, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $r$  – радиус капли,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $E_0$  – напряженность электрического поля на вершине капли. Для капли жидкого вольфрама диаметром  $\sim 100$  мкм в вакууме пороговая величина напряженности электрического поля из (2) составляет

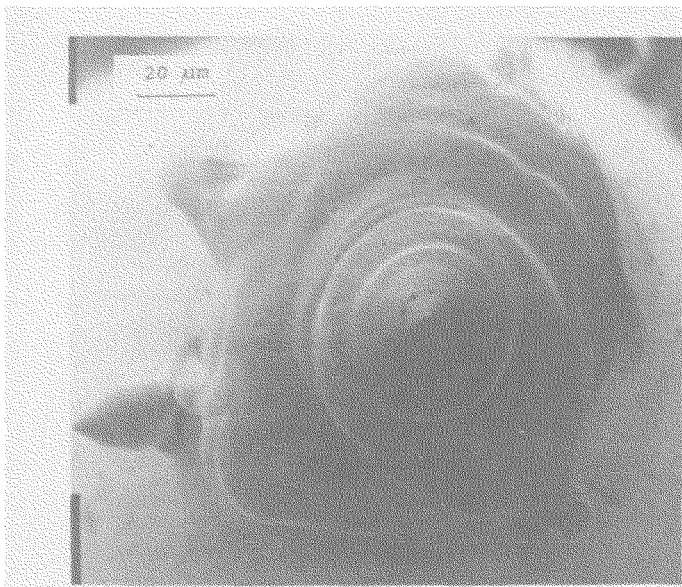


Рис.1б

$E_0 \approx 10^8$  В/м. Для типичных размеров анодных и катодных капель, находящихся в воздушных промежутках, образовавшихся после взрыва контактов, была численно рассчитана напряженность электрического поля путем решения двумерного уравнения Лапласа. При разности потенциалов между электродами  $\sim 10$  В напряженность электрического поля на вершинах капель составляла  $(2 \div 4) \cdot 10^5$  В/м. В этом случае неравенство (2) дает верхнюю оценку для коэффициента поверхностного натяжения жидкого вольфрама на воздухе  $\gamma_{w-air} = 0.25 \epsilon_0 r E_0^2 \approx 10^{-5}$  Дж/м<sup>2</sup>. Эта величина на 4 порядка меньше величины коэффициента поверхностного натяжения жидкой окиси вольфрама на воздухе (0.1 Дж/м<sup>2</sup> [3]) и более чем на 5 порядков величины меньше поверхностного натяжения жидкого вольфрама в вакууме (2.316 Дж/м<sup>2</sup>) [4].

Такая anomalно низкая величина  $\gamma_{w-air}$  ставит под сомнение нашу интерпретацию образования КТ из капли жидкого вольфрама. Однако обратимся ко второму условию. Оно состоит в том, что время вытягивания КТ  $t_0$  должно соответствовать длительностям пауз тока в разрядной цепи при возникновении повторных контактов (рис.4б). Из анализа динамики развития ЭГД неустойчивости, приводящей к формированию КТ [5], следует, что

$$t_0 = \frac{2\gamma}{E_0^3} \sqrt{\frac{\rho}{\epsilon_0^3} \ln \left( \frac{2\gamma}{\xi_0 \epsilon_0 E_0^2} \right)}, \quad (3)$$

где  $\xi_0$  - амплитуда начальных возмущений поверхности жидкости. Принимая  $\gamma = \gamma_{w-air}$  и  $\xi_0 = 0.2r$  [6], из (3) получаем величины  $t_0$ , сравнимые с длительностями пауз тока ( $\sim 1$  мс).

Третье условие состоит в том, что время вытягивания КТ  $t_0$  не должно превышать время существования жидкой капли. Численные расчеты показали, что время существования расплава на вершине анода может достигать нескольких миллисекунд.

В пользу концепции развития ЭГД неустойчивости в описываемых экспериментах свидетельствует также формирование КТ, происходящее не только на вершине основной капли, образовавшейся в результате протекания тока

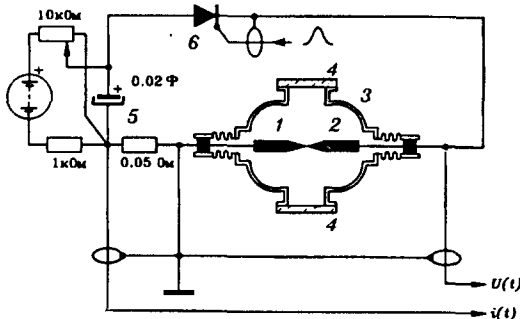


Рис.2. Блок-схема эксперимента по исследованию ЭГД явлений во взрывающихся контактах. 1,2 – острия, находящиеся в контакте; 3 – экспериментальная камера; 4 – оптические окна; 5 – накопительный конденсатор; 6 – тиристорный ключ

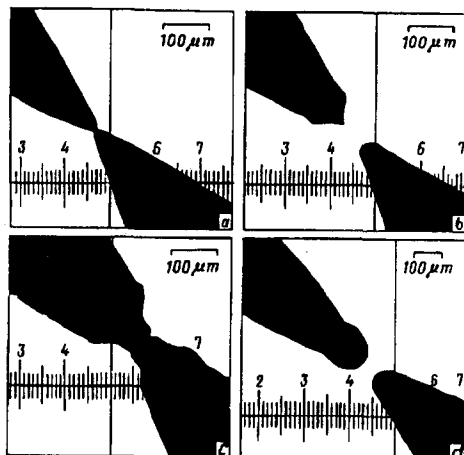


Рис.3. Теневые фотографии: контакта до взрыва (а); воздушного промежутка после взрыва контакта (б); контактного мостика (с); вакуумного промежутка после взрыва контакта (d). На всех фотографиях сверху – аноды

через контакт и последующего горения дуги, но и на мелких каплях, образовавшихся в результате взрыва и отброшенных на некоторое расстояние от взорвавшегося контакта (рис.1б). Нам не представляется возможным иначе объяснить идентичность образующихся конусов, что характерно именно для КТ, а также возникновение повторных контактов.

Теперь остановимся на факте образования застывших конусов преимущественно на анодной капле. Мы это связываем с тем, что при горении короткой дуги основное энерговыделение происходит на аноде [7]. Это приводит к тому, что анодная капля в наших экспериментах существенно превосходит катодную по размерам (рис.3d). Из-за малой толщины расплава катодные капли остывают значительно быстрее, что препятствует формированию конусов на катодах. Однако при повышении напряжения на накопительной емкости выше

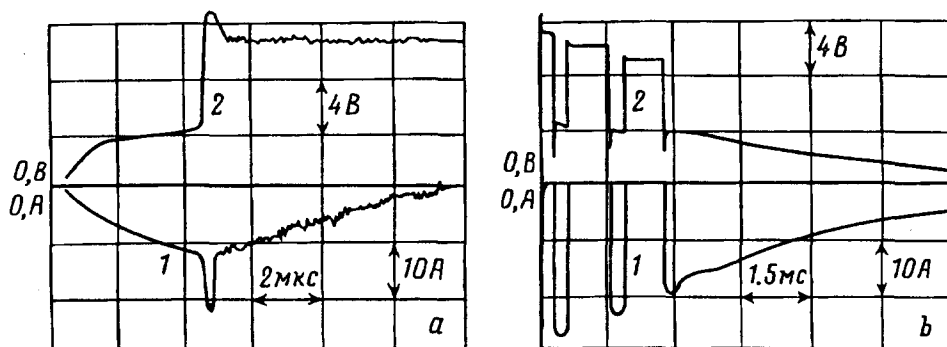


Рис.4. Осциллограммы импульсов тока 1 и напряжения 2 при взрыве контактов

20 В, обеспечивающем импульс тока амплитудой более 50 А, образование конусов на катодных каплях происходило равновероятно с образованием конусов на аноде. При этом на аноде вырастали, кроме основного большого конуса, дополнительные меньшие по размерам конуса. При напряжении на накопительной емкости более 50 В обе застывшие капли были всегда покрыты большим количеством конусов (рис.1а).

Эксперименты по взрыву вольфрамовых контактов в инертных газах, в азоте и в вакууме (рис.3а) показали, что аномальные явления при отсутствии кислорода в окружающей среде не происходят. Не выявили аномалии также эксперименты с другими металлами в тех же условиях, включая эксперименты на воздухе.

Таким образом, образование конусов на застывших каплях в слабых электрических полях происходит только в случае взрыва вольфрамовых контактов в кислородсодержащей атмосфере. Однако, как было показано выше, это возможно лишь при условии аномально низкого ( $\gamma \leq 10^{-5}$  Дж/м<sup>2</sup>) поверхностного натяжения. Из известных нам жидкостей соизмеримым поверхностным натяжением обладает лишь сжиженный гелий [4]. Причем, для сверхтекучего гелия при искусственно заряженной поверхности величина порогового электрического поля развития ЭГД неустойчивостей составляет  $\sim 2 \cdot 10^5$  В/м [8,9], что связано с низким поверхностным натяжением жидкого гелия. Столь же малое поверхностное натяжение жидкого вольфрама на воздухе не характерно для границы раздела металл-газ. Нам не представляется возможным объяснить наблюдаемую аномалию только особенностями кинетики окисления вольфрама, так как закономерности окисления молибдена аналогичны случаю окисления вольфрама [10]. Однако подобные явления не наблюдаются при взрыве контактов молибденовых игл в тех же условиях. Таким образом, наблюдаемое явление уникально по своей природе, и авторы не располагают в настоящий момент достаточной информацией для объяснения наблюдаемой аномалии.

Авторы выражают благодарность А.Б.Маркову за проведение тепловых расчетов, результаты которых использовались при обсуждении экспериментов.

- 
1. Г.А.Месяц, *Эктоны*, Екатеринбург: УИФ Наука, ч. 1, 1993.
  2. L.Tonks, *Phys. Rev.* **48**, 562 (1935).
  3. *Физико-химические свойства окислов*, под ред. Г.В. Самсонова, М.: Metallurgy, 1978.
  4. *Физические величины. Справочник*, под ред. И.С.Григорьева и И.З.Мейлихова, М.: Энергоатомиздат, 1991.
  5. L.M.Baskin, A.V.Batrakov, S.A.Popov, and D.I.Proskurovsky, *IEEE Trans. on Dielect. and Electr. Insul.* **2**, 231 (1995).
  6. А.В.Батраков, С.А.Попов, Д.И.Проскуровский, *Письма в ЖТФ* **19**, 66 (1993).
  7. И.Н. Сливков, *Электроизоляция и разряд в вакууме*, М.: Атомиздат, 1972.
  8. В.П.Володин, М.С.Хайкин, *Письма в ЖЭТФ* **30**, 608 (1979).
  9. А.П.Володин, М.С.Хайкин, В.С.Эдельман, *Письма в ЖЭТФ* **26**, 707 (1977).
  10. И.И.Корнилов, В.В.Глазова, *Взаимодействие тугоплавких металлов переходных групп с кислородом*, М.: Наука, 1967.