

12

Влияние материала электродов на движение плазменного поршня в рельсовых ускорителях

© С.В. Бобашев, Б.Г. Жуков, Р.О. Куракин,
С.А. Поняев, Б.И. Резников

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: boris.reznikov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 21 мая 2015 г.

Экспериментально изучено ускорение плазменного поршня в каналах рельсовых ускорителей с медными и графитовыми электродами. Обнаружено, что при одинаковых разрядных токах замена медных электродов на графитовые приводит к снижению скорости плазмы на 15–20%, что объясняется увеличением эрозионной массы графита, вовлекаемой в движение плазменным поршнем. На основании интерпретации полученных данных сделан вывод, что при больших скоростях плазмы протекание тока в каналах рельсовых ускорителей определяется процессами термоавтоэлектронной эмиссии.

Исследования электромагнитных рельсовых ускорителей (рельсо-тронов) ведутся уже свыше 30 лет, по-прежнему сохраняя свою актуальность [1,2]. Тем не менее, ряд принципиальных вопросов, в частности согласование эмиссионных и разрядных токов в рельсо-тронах с плазменным поршнем (ПП) [3–5], еще не нашли своего адекватного рассмотрения. Для обеспечения плотности разрядного тока $10^8 - 10^9 \text{ A/m}^2$, наблюдаемой в экспериментах, предположение, что ток с электродов поступает в плазму за счет термоэмиссии, дает оценку температуры поверхности рельсов, контактирующей с ПП, свыше 5000 К [3]. При этом при высоких скоростях движения ПП по каналу (2 km/s и выше) разогрев должен происходить за очень короткое время ($\leq 1 \mu\text{s}$). Накопительные устройства, используемые в экспериментах, не могут обеспечить требуемой для этого мощности. Однако, если предположить [6,7], что ток в плазму поступает с рельсов за счет взрывной эмиссии [8,9], разогрев поверхности электрода до таких температур не требуется, и проблема согласования токов разрешается. Цель данной работы — определение физического механизма прохождения тока в ка-

нале рельсотрона. Для этого исследуется влияние материала электродов на явления, сопровождающие движение свободного (без ускоряемого тела) ПП в рельсовых каналах. В качестве материалов сравниваются медь и графит. При близких значениях работы выхода электронов эти материалы различаются по теплопроводности, вследствие чего при одинаковых скоростях движения ПП температура поверхности рельсов в зоне контакта с ПП должна сильно различаться для медных и графитовых электродов. Если работает механизм термоэмиссии, условия для протекания разрядных токов, формирования ПП и разгона в канале также будут существенно отличаться, и это должно проявиться в эксперименте.

Результаты наших экспериментов с медными электродами описаны в работах [6,7]. Для проведения экспериментов с графитом конструкция разрядного канала модифицировалась: на внутреннюю поверхность медных электродов по всей длине канала накладывалась фольга из терморасширенного графита толщиной 0.8 mm. Ускоритель запитывался от LC-линии, служившей источником тока в экспериментах с медными рельсами [6,7]. Во время ускорения ПП знак потенциалов электродов не менялся. При одинаковых зарядных напряжениях LC-линии разрядные токи для медных электродов и электродов с накладками из графита совпадали, т.е. дополнительное омическое сопротивление на слое фольги, контактирующей с ПП, было незначительным. Распределение и величина магнитного поля в канале с графитовыми накладками при одинаковых токах незначительно отличались от случая медных электродов. Специальные измерения показали, что погонная индуктивность для электродов с графитовой накладкой была немного меньше — $L'_C = 0.34 \mu\text{H/m}$ ее значения для рельсов из меди $L'_{Cu} = 0.37 \mu\text{H/m}$. В эксперименте регистрировались полный ток через ускоритель I , напряжение между рельсами на выходе из канала $U_{\text{вых}}$ и интенсивность оптического излучения через боковую стенку канала ускорителя в двух сечениях S_1 , S_2 , отстоящих на 80 и 5 mm от его дульного среза. Измеряемая скорость ударной волны (УВ) D , генерируемой ПП в канале, является ее средней скоростью между сечениями S_1 , S_2 . Перед пуском канал ускорителя сечением $A = 6.5 \times 5.5 \text{ mm}$ заполнялся гелием при начальном давлении $p_1 = 250 \text{ Torr}$ или аргоном при $p_1 = 25 \text{ Torr}$, что в разных опытах обеспечивало одинаковую начальную плотность среды ρ_1 .

На рис. 1 для медных и графитовых электродов для скоростей УВ 7.4–8.9 km/s представлены распределения интенсивности свечения по

каналу как функции расстояния δ от фронта УВ. Видно, что ПП представляет собой структуру, имеющую отчетливо выраженную головную часть, обеспечивающую основную долю токопрохождения, и протяженный „хвост“, перехватывающий ток по мере выхода головной части через дульный срез канала ускорителя. Для обоих типов электродов распределения свечения в каналах, заполненных гелием и аргоном, похожи, при этом свечение области ударно-сжатого слоя (УСС) между фронтом УВ и ПП при достигнутых скоростях УВ в гелии не наблюдается. В отличие от этого при заполнении канала аргоном интенсивное свечение начинается сразу же за фронтом УВ и по яркости сопоставимо с излучением от ПП, хотя для данного режима яркость должна быть заметно меньше (температура плазмы ПП 2.5–3 eV, а температура плазмы УСС по расчетам ударных адиабат 1.7–1.8 eV). Интерпретация возникновения свечения в аргоне при больших скоростях ПП дана в работах [6,7]. При движении по каналу рельсового ускорителя ПП сжимает газ, заполняющий канал, что приводит к образованию сильной УВ. Основной особенностью, влияющей на формирование УВ и течение в УСС, является присутствие электрического поля $E = U_p/w \sim 150\text{--}200$ V/cm в зоне течения, где U_p — разность потенциалов между электродами, равная омическому падению напряжения на ПП, w — расстояние между рельсами. При высокой концентрации зарядов после прохождения УВ в аргоне ($n_e \sim 10^{18}\text{--}10^{19}$ см⁻³) поле концентрируется в узких приэлектродных слоях толщиной порядка дебаевского радиуса $r_d = [8\pi e^2 n_e / (kT)]^{-1/2} \sim 10^{-6}$ см. Возникающая вблизи поверхности электродов напряженность поля $E_e \approx U_p/r_d \sim 10^7\text{--}10^8$ V/cm достаточна для возникновения взрывной эмиссии с поверхности электродов [8,9]. Поток электронов в результате термоавтоэлектронной эмиссии приводит к увеличению интенсивности свечения в УСС. Плотность тока в максимуме возрастает, а сам максимум смещается к фронту УВ, что делает головную часть ПП более компактной (рис. 1, *a, b*). Следует отметить, что при замене рабочих поверхностей электродов с медных на графитовые формирование ПП затягивается, фронт ПП отстает от фронта УВ, и наблюдается образование достаточно интенсивного свечения в „хвосте“ ПП. Эксперименты с разными парами электродов (медь–графит) (рис. 1, *c*) показали, что распределение интенсивности свечения и тока в ударно-сжатом слое и ПП также зависят от полярности графитового электрода. Свечение в „хвосте“ ПП определяется потоком слабо ионизированного вещества с поверхности анода. В случае графитового анода влияние материала усиливается из-за

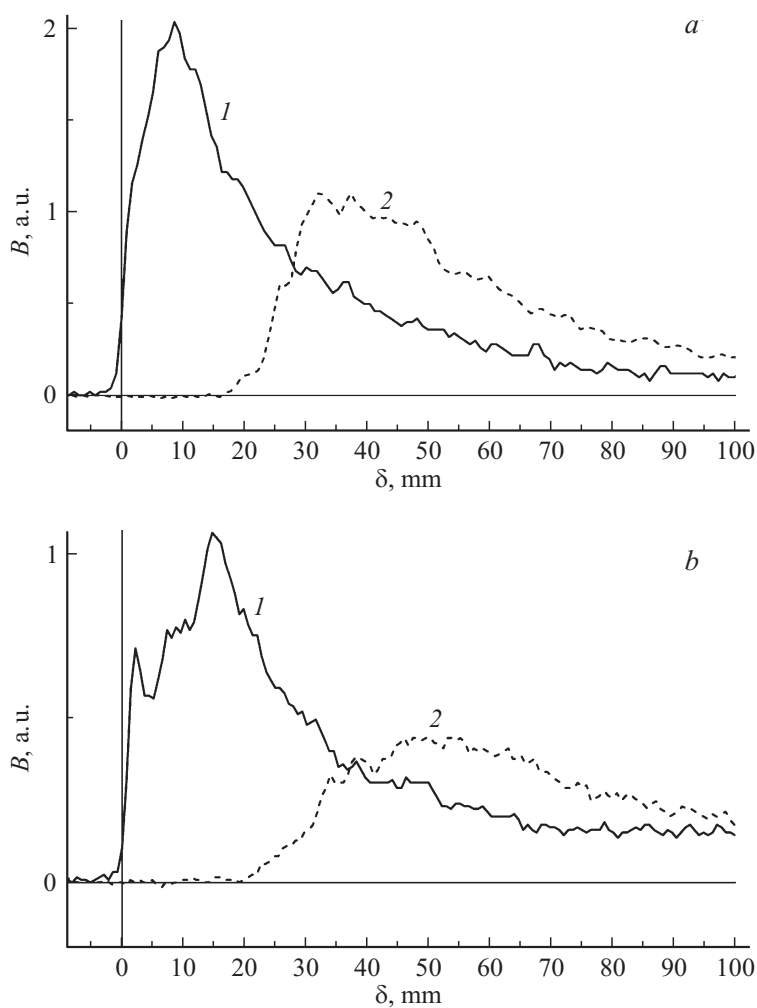


Рис. 1. Распределение интенсивности свечения B в канале как функция расстояния $\delta = (t - t_{sw})D_{\text{exp}}$ от фронта УВ, t_{sw} — момент прохождения сечения x_{sw} ударной волной, D_{exp} — скорость УВ в момент t_{sw} . *a* — медные электроды, 1 — Ag, $p_1 = 25$ Торг, 2 — He, $p_1 = 250$ Торг; *b* — графитовые электроды, 1 — Ag, $p_1 = 25$ Торг, 2 — He, $p_1 = 250$ Торг. *c* — 1 — медные электроды, 2 — графитовые электроды, 3 — анод-графит, катод-медь, 4 — анод-медь, катод-графит. Канал заполнен аргоном, $p_1 = 25$ Торг.

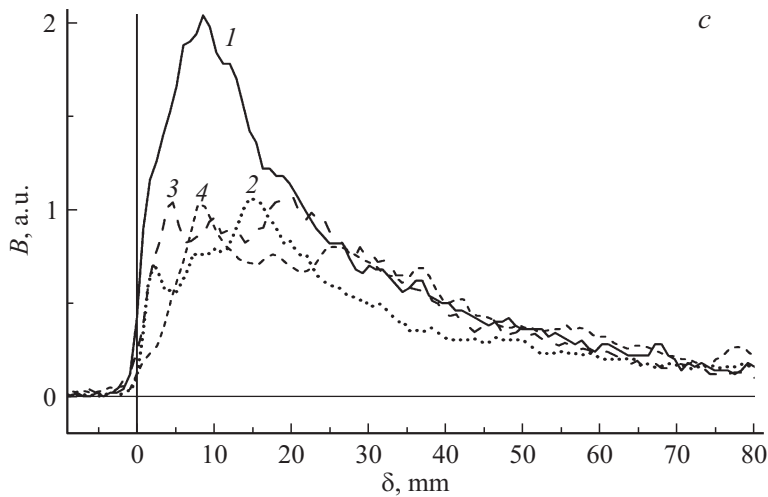


Рис. 1 (продолжение).

того, что при значительно меньшей, чем у меди, теплопроводности графит подвержен большему локальному поверхностному разогреву, что увеличивает поток эрозионной массы по сравнению с медным анодом.

При равенстве полных разрядных токов измеренная скорость УВ для канала с графитовыми электродами заметно ниже (рис. 2), чем в случае медных электродов. При фиксированном материале электродов величина скорости при одинаковой начальной плотности газа в канале практически одинакова и в гелии, и в аргоне. Полная проводимость области, занятой ПП и УСС $\Sigma = I/u_{\text{миз}}$, оцениваемая по измеренным полному току I и разности потенциалов $u_{\text{миз}}$ между рельсами на выходе из канала, не показала существенной зависимости от сорта газа, заполняющего канал. Замена медной поверхности рельсов на графитовую примерно на 20% снижает величину Σ (рис. 3).

Снижение скорости ПП при использовании графитовой накладки можно объяснить увеличением эрозионной массы графитовых электродов и дополнительной силы F_{er} , тормозящей ПП при захвате и вовлечении в движение большей эрозионной массы, потерянной электродами [7,10]. В режиме насыщения скорости ПП ($v \approx v_{\text{max}}$) ускоряющая

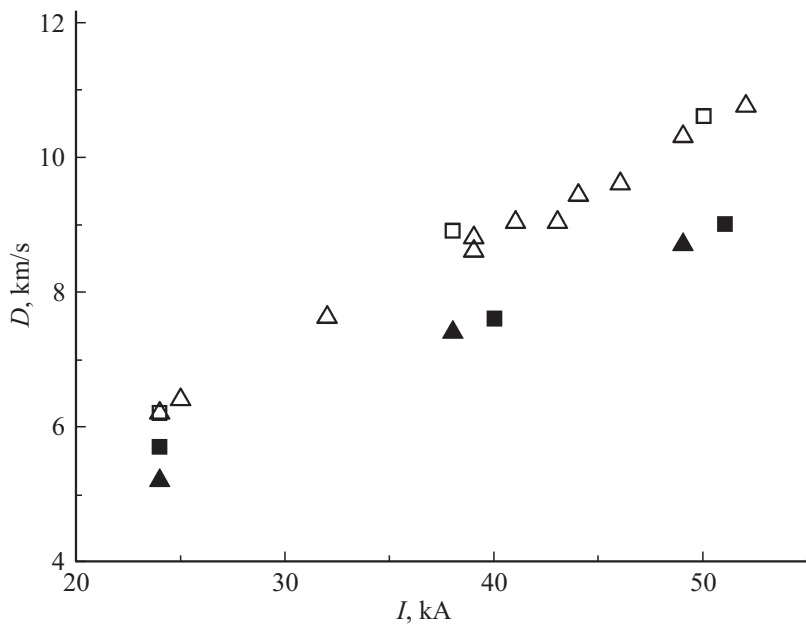


Рис. 2. Скорость УВ в каналах с электродами из меди и графита в зависимости от разрядного тока. Медные рельсы: Δ — Ar, 25 Торг, \square — He, 250 Торг. Графитовые рельсы: \blacktriangle — Ar, 25 Торг, \blacksquare — He, 250 Торг.

амперова сила F_A , сила давления газа за ударной волной $F_d = p_2 A$ и сила $F_{er} = \dot{m} v$ уравниваются друг друга $F_A = F_d(v_{\max}) + F_{er}(v_{\max})$. Здесь \dot{m} — скорость изменения массы ПП, $p_2 \approx \rho_1 D^2 (1 - \rho_1/\rho_2)$, $v \approx v_{\max} = D[1 - \rho_1/\rho_2]$, $\rho_1/\rho_2(D)$ — отношение плотностей газа до и после прохождения УВ. Значение \dot{m} и отношение F_{er}/F_d можно определить из условия равновесия сил, измеряя скорость УВ D и рассчитывая $\rho_1/\rho_2(D)$

$$\dot{m} = \frac{F_A}{D(1 - \rho_1/\rho_2)} - \rho_1 A D, \quad F_A = \frac{L'I^2}{2}, \quad F_{er}/F_d = \dot{m}/(\rho_1 A D). \quad (1)$$

Выражение для \dot{m} (в другом виде) получено в нашей предыдущей работе [10] и использовалось для оценки \dot{m} и эффективного коэффициента эрозии $k_{eff} = d\dot{m}/dI$ при обработке серии экспериментов [11].

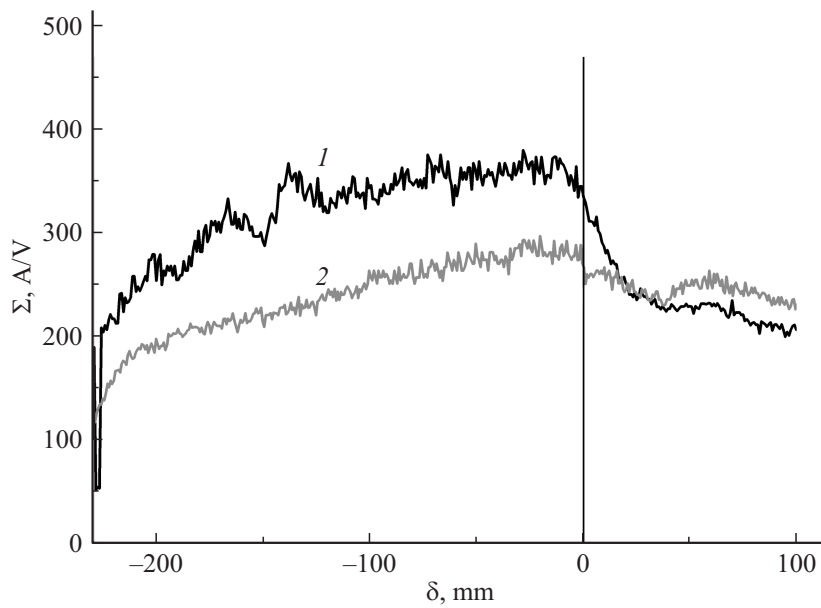


Рис. 3. Проводимость области, занятой ПП и ударно-сжатым слоем $\Sigma = I/u_{\text{мис}}$ в канале. Аргон, $p_1 = 25 \text{ Torr}$. Электроды: 1 — Cu, 2 — C. $\delta = (t - t_e)D$, t_e — момент начала истечения УСС из канала.

Отношение F_{er}/F_d существенно зависит от произведения $\rho_1 A$ и может изменяться в широком диапазоне значений. Результаты расчетов \dot{m} и F_{er}/F_d приведены в таблице, где во втором и третьем столбце указаны материалы анода и катода. Из таблицы следует, что при постоянном значении ρ_1 в каналах, заполненных аргоном и гелием, и равной амперовой силе значения \dot{m} , k_{eff} и F_{er}/F_d больше для графитовых электродов, чем для медных, что объясняет уменьшение скорости УВ и ПП. При электродах из различных материалов изменение полярности электродов в пределах точности эксперимента не влияет на скорость УВ и ПП.

В заключение сформулируем основные положения данной статьи и работ [6,7], которые являются основанием для вывода о том, что при высоких скоростях ПП взрывная (термоавтоэлектронная) эмиссия электродов [8,9] является физическим механизмом, определяющим

Скорость изменения массы ПП и эффективный коэффициент эрозии k_{eff} для различных материалов электродов (аргон, $p_1 = 25$ Torr; гелий, $p_1 = 250$ Torr)

| Газ | Анод | Катод | I , kA | D , km/s | v , km/s | \dot{m} , kg/s | F_{er}/F_d | k_{eff} , mg/C |
|-----|------|-------|----------|------------|------------|------------------|--------------|------------------|
| Ar | Cu | Cu | 39 | 8.8 | 8.0 | 0.018 | 1.0 | 0.79 |
| Ar | C | C | 38 | 7.4 | 6.7 | 0.022 | 1.5 | 0.9 |
| He | Cu | Cu | 38 | 8.9 | 6.6 | 0.023 | 1.3 | 1.01 |
| He | C | C | 40 | 7.6 | 5.6 | 0.034 | 2.2 | 1.34 |
| Ar | Cu | C | 38 | 7.9 | 7.1 | 0.022 | 1.4 | 0.94 |
| Ar | C | Cu | 37 | 7.8 | 7.1 | 0.020 | 1.3 | 0.93 |

зарождение и протекание тока в канале рельсового ускорителя, а также движение и эволюцию ПП. 1. Свечение в УСС появляется только при превышении некоторой пороговой скорости, когда высокая плотность объемного заряда в приэлектродных слоях создает электрические поля большой напряженности, достаточные для возникновения взрывной эмиссии. 2. Распределение интенсивности свечения существенно зависит от характеристик заполняющего канал газа, материала электродов и состояния их рабочих поверхностей. Для медных электродов форма распределения интенсивности свечения УСС и плотности тока является более компактной, чем для графитовых. 3. На поверхности электродов после однократного запуска наблюдается система эрозионных пятен малого размера (микрократеров), более характерных для искровых разрядов, и отсутствуют сплошные протяженные зоны сильной эрозии [3,12–14].

Соавторы Поняев С.А. и Куракин Р.О. благодарны за финансовую поддержку проекту РФФИ № 15-08-05010.

Список литературы

- [1] *Wetz D.A., Jr., Stefani F., McNab I.R.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. V. 39. N 1. P. 180.
- [2] *Merritt E.C., Moser A.L., Hsu S.C., Loverich J., Gilmore M.A.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111. 085 003.
- [3] *Анисимов А.Г., Матросов А.Д., Швецов Г.А.* // ПМТФ. 2002. Т. 43. В. 3. С. 39.
- [4] *Бейлис И.И., Осташев В.Е.* // ТВТ. 1989. Т. 27. В. 6. С. 1041.

- [5] *Ткаченко Г.В., Урюков Б.А.* // ТВТ. 2014. Т. 52. В. 5. С. 797.
- [6] *Бобашев С.В., Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Поняев С.А., Резников Б.И.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 22. С. 37–44.
- [7] *Бобашев С.В., Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Поняев С.А., Резников Б.И., Твердохлебов К.В.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 1. С. 39–46.
- [8] *Месяц Г.А.* Эктонны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000. 424 с.
- [9] *Баренгольц С.А., Месяц Г.А., Цвентух М.М.* // ЖЭТФ. 2008. Т. 34. В. 6(12). С. 1213–1224.
- [10] *Резников Б.И., Бобашев С.В., Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Поняев С.А., Розов С.И.* // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 4. С. 31–34.
- [11] *Бобашев С.В., Резников Б.И., Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Поняев С.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 13. С. 64–71.
- [12] *Белкин Г.С., Киселев В.Я.* // ЖТФ. 1966. Т. 36. В. 2. С. 384–389.
- [13] *Donaldson A.L., Kristiansen M., Watson A. et al.* // IEEE Trans. Magn. 1986. V. 22. N 6. P. 1441–1446.
- [14] *Богомаз А.А., Будин А.В., Коликов В.А., Пинчук М.Э., Позубенков А.А., Рутберг Ф.Г.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 1. С. 28–35.