

УДК 533.9

## К АНАЛИЗУ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ В РЕЛЬСОВОМ УСКОРИТЕЛЕ

А. Г. Анисимов, А. Д. Матросов, Г. А. Швецов

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Анализируются некоторые физические процессы, происходящие на поверхности электродов в рельсовом ускорителе с плазменным поршнем при линейной плотности тока, превышающей критические значения. Показано, что в типичных условиях экспериментов неустойчивости Рэля — Тейлора, Кельвина — Гельмгольца и магнитогидродинамические неустойчивости, возникающие при взаимодействии протекающего тока с собственным магнитным полем, могут развиваться за времена, много меньшие, чем время работы ускорителя, и являться причиной поступления материала электродов в разряд. Проведенная импульсная рентгеновская съемка поверхности электродов подтвердила наличие неоднородностей и выброса материала с поверхности. При определенных условиях зафиксировано появление проводящих струй с поверхности электрода.

### ВВЕДЕНИЕ

В течение последних 15–20 лет большое внимание уделяется изучению электромагнитных методов ускорения твердых тел до высоких скоростей. Ожидалось, что использование электромагнитных сил для ускорения твердых тел позволит получить скорости, значительно превышающие достигнутые в экспериментах. Большие надежды возлагались на получение высоких скоростей при ускорении диэлектрических твердых тел в рельсовых ускорителях (РУ) с плазменным поршнем (ПП). В частности, существуют проекты получения скоростей 12, 15, 25, 50 км/с и выше [1]. Однако исследования, проведенные в различных лабораториях, показали, что указанные проекты не учитывают ряд физических процессов, вызванных взаимодействием плазменного поршня со стенками канала ускорителя (прежде всего с поверхностью электродов).

Проведенные эксперименты и простые оценки показывают, что эффективного ускорения плазмы и твердых тел в РУ небольшой длины можно достичь в условиях, когда линейная плотность тока  $I/b$  существенно превышает критическую плотность тока  $(I/b)_{кр}$ , при которой температура поверхности электрода в выделенной точке за время прохождения через нее плазменного поршня достигает температуры плавления материала электрода (в общем случае температуры плавления стенок канала ускорителя) [2]. На поверхности электродов и изоляторов образуются соответственно слои расплавленного металла и материала изолятора. Под действием электромагнитных и других сил расплав может поступать в разрядный промежуток в виде капель (пара, плазмы) и существенно влиять на параметры разряда.

Аналізу сил, действующих на расплав в мощных дуговых разрядах, в литературе уделено много внимания, но из-за сложности и многообразия процессов существуют различные объяснения явлений выброса и каплеобразования [3].

Очевидно, что в зависимости от времени поступления в канал РУ эрозивной массы ее влияние может проявляться по-разному. Если поступление продуктов эрозии происходит практически мгновенно с задержкой несколько микросекунд, то это сразу приводит к изменению падения напряжения, распределения плотности тока, силы трения, действующей

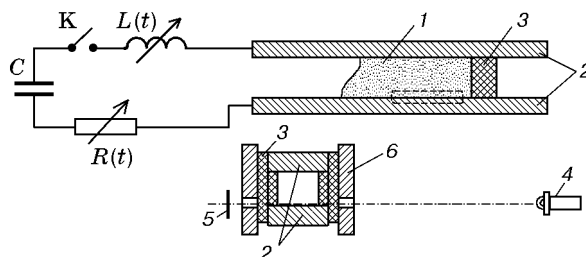


Рис. 1

на ПП со стороны стенок канала, и как следствие к изменению ускорения. Если поступление эрозионной массы происходит с задержкой порядка десятков и сотен микросекунд, это может приводить к образованию вторичных пробоев, если ПП в это время находится внутри канала РУ. При еще больших временах задержки (сотни микросекунд) появляется возможность исключить влияние эрозии на работу РУ. Собственно, к этому и сводятся работы по созданию эрозионно стойких материалов и исследования многосекционных РУ.

В данной работе приведены результаты исследования следов, оставшихся на поверхности электродов после взаимодействия с плазменным поршнем, а также результаты экспериментов по импульсному рентгенографированию поверхности электродов во время электрического разряда.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проведены в условиях магнитопржатого ( $H$ -прижатого) разряда, близких к условиям, реализующимся в рельсовом ускорителе на начальном этапе разгона твердого тела.

Схема эксперимента приведена на рис. 1 (1 — плазменный поршень, 2 — медные электроды, 3 — изоляторы, 4 — рентгеновская трубка, 5 — рентгеновская пленка, 6 — стальной бандаж). Рентгеновская трубка располагалась так, чтобы регистрировалась поверхность одного из электродов. Область, регистрируемая на пленке, выделена штриховой линией.

Емкость конденсаторной батареи составляла  $3,4 \cdot 10^{-3}$  Ф, рабочее напряжение — до 5 кВ. Максимальный ток разряда мог меняться в диапазоне 200–400 кА. В экспериментах использовались модели РУ с размерами канала  $2 \times 3$  и  $8 \times 8$  мм.

Проведены две серии экспериментов. В первой серии с помощью оптического микроскопа исследовались следы, оставшиеся на поверхности электродов после взаимодействия с плазмой разряда. Во второй серии с помощью импульсной рентгенографии изучалось состояние поверхности электродов во время разряда. Регистрация проводилась с помощью импульсного рентгеновского аппарата ПИР-100.

Большое давление в камере разряда не позволяет работать с малыми толщинами изоляторов. В экспериментах суммарная толщина стеклотекстолитовых изоляторов составляла 10 мм. В данной постановке удастся зарегистрировать изображение медной проволоочки диаметром 0,15 мм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**Исследование поверхности электродов после взаимодействия с плазмой  $H$ -прижатого разряда.** После эксперимента поверхность электродов исследовалась с помощью оптического микроскопа. Далее электроды разрезались для изготовления шлифов и изучения микроструктуры и микротвердости.

Отсутствие движения плотной плазмы вдоль поверхности электродов и быстрое остывание расплава позволяют сохранить рельеф после эксперимента. Следы воздействия ПП

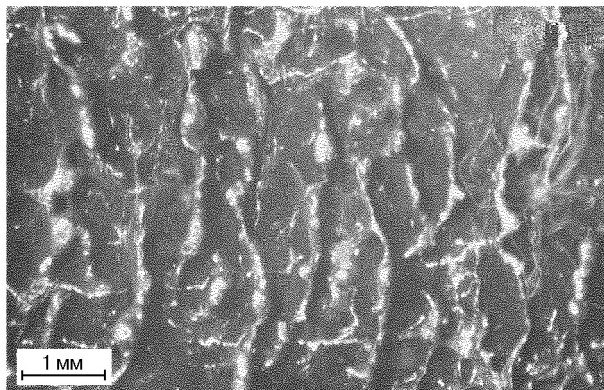


Рис. 2

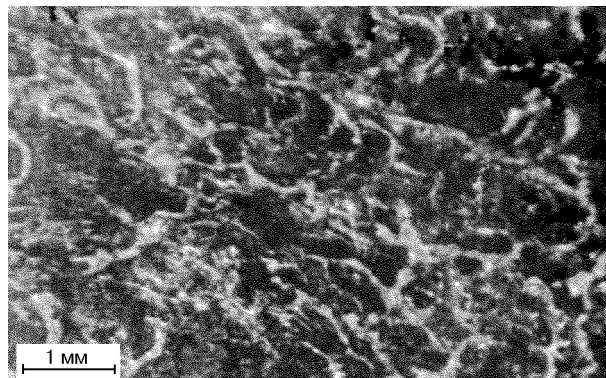


Рис. 3

на поверхность электродов условно делились на участки с размером, равным поперечному размеру канала. Наблюдается следующая картина теплового воздействия на электрод:

- на 1–5-м участках фиксируется плавление поверхности, характерная глубина расплава порядка 50 мкм;

- на 1–3-м участках формируется волновая структура с длиной волны порядка 1 мм и гребнями волн, параллельными магнитному полю (рис. 2);

- на 2–3-м участках происходит максимальное разрушение поверхности электродов (область максимального теплового воздействия); фиксируется большое количество крупных капель, волновая структура сменяется звездообразной с лучами в виде валов, сходящихся к центральному выступу;

- на 4–5-м участках расплав застывает в виде мелкой ряби (примерно 10 гребней на 1 мм), волновая картина (рис. 3) напоминает течение пленки жидкости по наклонной плоскости в поле тяжести [4];

- на 6–10-м участках цвет поверхности меняется из-за теплового воздействия, структура материала электрода близка к исходной.

С изменением энергии разряда картина теплового воздействия качественно не меняется.

Большое количество капель-выступов на поверхности медных электродов (в основном наблюдаемых на 2–3-м участках) можно разделить на четыре вида:

- 1) капли-выплески расплава без пор и газовыделения;
- 2) капли, насыщенные пузырьками, сросшиеся с поверхностью;
- 3) капли, имеющие ограниченный контакт с поверхностью;
- 4) полые образования (закрытые и открытые), имеющие вид цилиндра или сферы; высота и диаметр выступов достигают 1 мм (рис. 4).

При увеличении энергии разряда на поверхности расплава могут появляться капли размером несколько миллиметров, что сравнимо с размером канала.

Таким образом, из анализа следов взаимодействия плазмы с поверхностью электродов можно сделать следующие выводы:

1. Большое количество пор и полых структур свидетельствует о наличии процессов кипения и газовыделения.

2. На поверхности материала происходит течение расплава.

3. Наличие волновой структуры с длиной волны и ориентацией, зависящими от магнитного поля, свидетельствует о влиянии электромагнитных сил на формирование рельефа поверхности.

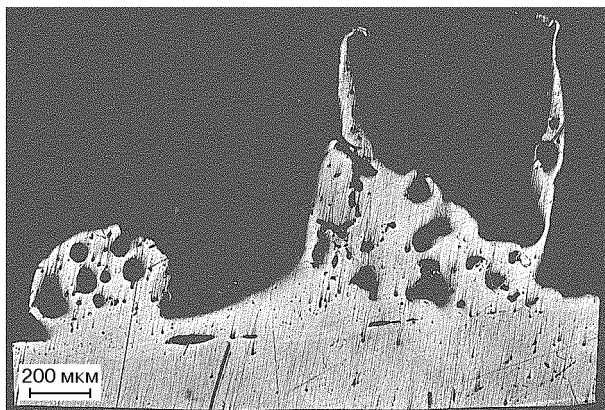


Рис. 4

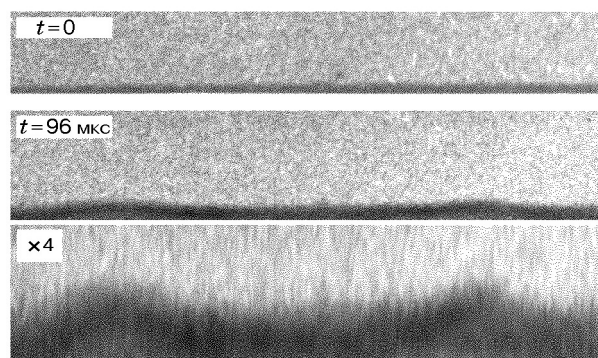


Рис. 5

Образование волн, выступов и капель может повлиять как на ресурс работы устройства (возможность повторного использования электродов), так и на процессы, происходящие во время разряда, если выступы образуются достаточно быстро.

С целью определения момента выброса материала и формирования рельефа проведены эксперименты с импульсной рентгенографией поверхности электрода во время электрического разряда.

**Импульсная рентгенография выброса расплава с поверхности электрода в *H*-прижатом разряде.** Рентгеновская съемка проведена в различные моменты времени при средней плотности тока  $j = 4 \cdot 10^9 \div 8 \cdot 10^9$  кА/м<sup>2</sup>.

К моменту достижения первого максимума тока ( $t = 48$  мкс) в канале размером  $2 \times 3$  мм поверхность медного электрода становится неровной, видны отдельные неоднородности высотой  $0,1 \div 0,2$  мм. При  $t = 96$  мкс (в этот момент ток равен нулю) поверхность становится волнистой. Видны два гребня высотой примерно  $0,2$  мм с длиной волны  $5 \div 6$  мм (рис. 5). В момент достижения минимума тока ( $t = 160$  мкс) в окрестности гребня волны зафиксированы выбросы материала размером  $0,5 \div 1,0$  мм (рис. 6). Выброс регистрируется в виде облака с размытыми границами, что не позволяет сделать однозначный вывод о состоянии вещества в этом выбросе. После эксперимента на электроде вблизи места выброса наблюдаются крупные капли размером порядка 1 мм.

В проведенных экспериментах с рентгенографированием плоской поверхности электродов в стационарном *H*-прижатом разряде получены следующие результаты:

1. Вблизи максимума тока разряда ( $t \approx 50$  мкс) на поверхности электрода появляются неоднородности с амплитудой, не превышающей  $0,1 \div 0,2$  мм, расстояние между ними составляет примерно 1 мм. Выброс материала не зафиксирован.

2. Размер неоднородностей не меняется до  $t = 90 \div 100$  мкс.

3. Позднее (в канале размером  $2 \times 3$  мм при  $t \approx 90$  мкс, в канале размером  $8 \times 8$  мм при  $t \approx 170$  мкс) кроме мелкомасштабной неустойчивости появляется волновая структура с длиной волны примерно 5 мм и высотой около  $0,2$  мм.

4. В момент достижения минимума тока (в экспериментах с каналом размером  $2 \times 3$  мм при  $t \approx 170$  мкс) в окрестности гребня волны происходит выброс материала, высота которого достигает 1 мм. По окончании эксперимента в этой области появляются капли диаметром примерно 1 мм.

5. В экспериментах с каналом размером  $8 \times 8$  мм капли диаметром порядка 1 мм образуются при  $t \approx 400$  мкс. При времени работы ускорителя менее 400 мкс такие капли не влияют на процесс ускорения в РУ, но могут определять унос массы с поверхности и ресурс работы канала. Определяющим механизмом образования капель и уноса расплава

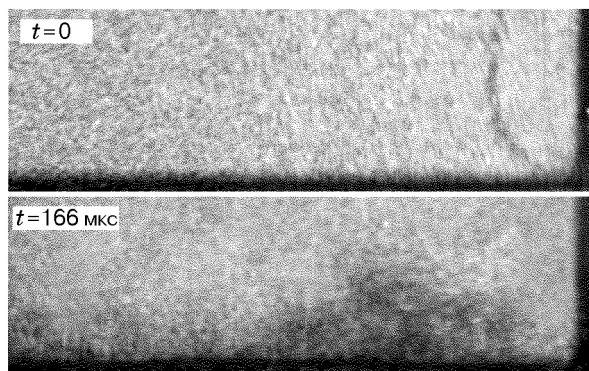


Рис. 6

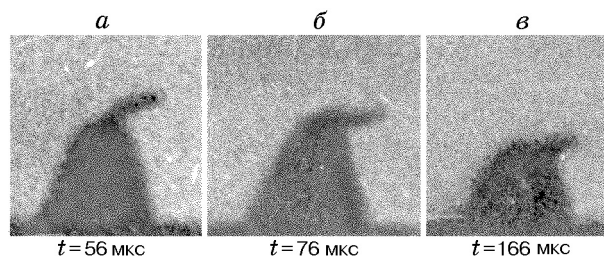


Рис. 7

с поверхности является либо вскипание перегретого расплава, либо вскипание расплава и расширение пор при падении давления в канале РУ.

Для увеличения плотности тока при том же давлении в разрядной камере проведены эксперименты с искусственно созданным медным выступом в форме эллипсоида вращения с полуосями  $a = 2,5$  мм,  $b = 1$  мм. Выступ располагался на поверхности медного электрода в канале сечением  $8 \times 8$  мм. Плотность тока в вершине эллипсоида составляет примерно  $6 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup>. При  $t = 56$  мкс зарегистрирован выброс материала электрода из вершины эллипсоида в виде струи длиной примерно 2 мм (рис. 7, а). На рис. 7, б, в видны выбросы, полученные в аналогичных экспериментах в более поздние моменты времени. Во всех экспериментах струя отклоняется в направлении действия электромагнитной силы. Это позволяет сделать вывод о том, что по ней течет ток, т. е. вещество выбрасывается в проводящем состоянии. Оценка скорости струи дает значение  $V \gtrsim 40$  м/с.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенные выше результаты экспериментов показывают, что во время разряда на поверхности электродов развиваются неустойчивости, которые могут приводить к поступлению материала электрода в канал ускорителя. Оценим длину волны  $\lambda_{\max}$  и характерное время нарастания  $\tau$  наиболее быстро развивающегося возмущения некоторых видов неустойчивостей при толщине слоя расплава 50 мкм и коэффициенте поверхностного натяжения расплава  $T = 1,1$  Н/м.

**Неустойчивость Рэлея — Тейлора.** Считая, что во время работы ускорителя электроды могут двигаться с ускорением  $g \approx 4 \cdot 10^6$  м/с<sup>2</sup> [5], нетрудно получить оценки  $\lambda_{\max} = 7 \cdot 10^{-5}$  м и  $\tau = 2 \div 3$  мкс, что примерно на два порядка меньше характерного времени работы рельсового ускорителя.

**Неустойчивость Кельвина — Гельмгольца.** Используя известные формулы [4] для плазмы плотности  $\rho \approx 1$  кг/м<sup>3</sup>, движущейся со скоростью  $v = 10^3$  м/с параллельно границе раздела плазмы со средой плотности  $\rho_2 = 9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> (расплав), получим оценки длины волны  $\lambda_{\max} = 10^{-5}$  м и характерное время развития неустойчивости  $\tau < 1$  мкс.

**“Перетяжная” неустойчивость жидкой проводящей поверхности под действием сильно скинированного электрического тока.** Ограничимся качественными оценками для электрода цилиндрической формы. В соответствии с работой [6] проанализируем устойчивость жидкого цилиндрического проводящего слоя, находящегося на поверхности твердого проводящего стержня, в магнитном поле протекающего по проводнику тока. Электрический ток течет по жидкому слою и части твердого стержня. Жидкость считалась невязкой и несжимаемой, учитывались поверхностное натяжение и инерция жидкости. Анализ полученного дисперсионного соотношения показывает, что в случае тонкого расплавленного слоя наличие твердого стержня приводит к резкому уменьшению

инкремента и смещению его максимума в область более коротких длин волн по сравнению со случаем жидкого цилиндра. В то же время уменьшение глубины проникновения тока  $\delta$  приводит к резкому увеличению инкремента.

При радиусе проводника  $r_0 = 3 \cdot 10^{-3}$  м,  $\delta = 5 \cdot 10^{-4}$  м,  $I/b = 10^7$  А/м длина волны  $\lambda_{\max} \approx 0,25$  мм, характерное время нарастания  $\tau \approx 10$  мкс. При уменьшении  $I/b$  до значений  $10^6 \div 2 \cdot 10^6$  А/м длина волны  $\lambda_{\max}$  увеличивается до значений порядка 1 мм, а характерное время роста возмущений  $\tau$  — до нескольких сотен микросекунд. Полученные оценки длины волны близки к наблюдаемым в эксперименте.

**Неустойчивость жидкой проводящей поверхности при протекании через нее электрического тока.** Проведенный в работе [7] анализ показал, что при протекании электрического тока через границу двух сред с сильно различающимися проводимостями (расплава на поверхности электрода и плазмы) эта граница может быть неустойчивой. Оценки показывают, что при плотности тока  $j = 5 \cdot 10^9$  А/м<sup>2</sup> длина волны  $\lambda_{\max} = 0,5 \times 10^{-3}$  м, характерное время  $\tau = 50$  мкс. Поскольку в РУ локальная плотность тока может быть выше средней плотности, развитие этого вида неустойчивости также может влиять на процесс ускорения.

Таким образом, поступление материала электродов в разряд возможно за времена, существенно меньшие или сравнимые со временем работы ускорителя.

Проведенные исследования показали, что при оценке потенциальных возможностей ускорения твердых тел в РУ с плазменным поршнем необходимо учитывать сложные физические процессы и явления, возникающие в канале РУ при взаимодействии ПП с поверхностью электродов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Shvetsov G. A., Titov V. M.** Railgun accelerators of macroparticles: hopes and reality // Megagauss fields and pulsed power systems. N. Y.: Nova Sci., 1987. P. 767–772.
2. **Чистяков В. П., Швецов Г. А.** О критической плотности тока в рельсотронных ускорителях с плазменным поршнем // ПМТФ. 1988. № 1. С. 20–27.
3. **Буткевич Г. В., Белкин Г. С., Ведешенков Н. А., Жаворонков М. А.** Электрическая эрозия высокопоточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978.
4. **Алексеев С. В., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г.** Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 1992.
5. **Shvetsov G. A., Ermolenko V. M., Kurguzov V. D., et al.** Structural response of a railgun accelerator // IEEE Trans. Magn. 1995. V. 31. P. 657–660.
6. **Самуйлов С. Д., Семенов А. А.** Магнитогидродинамическая неустойчивость слоя проводящей жидкости, расположенной на поверхности твердого проводящего стержня, возникающая при пропускании сильно скинированного электрического тока // Журн. техн. физики. 1992. Т. 62, вып. 8. С. 38–47.
7. **Анисимов А. Г.** Экспериментальное исследование взаимодействия плазменного поршня с поверхностью электродов в канале рельсового ускорителя: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2001.

*Поступила в редакцию 28/1 2002 г.*