

УДК 537.523.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА СТВОЛА ГИБРИДНОГО КООКСИАЛЬНОГО МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ В РЕЖИМЕ УСКОРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Д. Ю. Герасимов, А. А. Сивков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск
E-mail: mpt@elti.tpu.ru

Исследованы основные закономерности электроэрозионного износа ствола гибридного коаксиального магнитоплазменного ускорителя в режиме ускорения твердых тел. Для того чтобы значительно уменьшить эрозионный износ ствола, не меняя динамические параметры метаемого тела, в процессе метания твердых тел была использована система шунтирования разряда в ускорительном канале. Показано, что плазменная структура сильноточного дугового разряда имеет фонтанообразную форму, а ее перемычка состоит из многочисленных радиальных дискретных каналов проводимости.

Ключевые слова: гибридный коаксиальный магнитоплазменный ускоритель, метание твердых тел, электроэрозионный износ ствола, плазменная структура.

Значимость проблемы сверхзвукового ускорения твердых тел обусловлена его использованием в современных перспективных областях физики и новейших технологиях. Теоретически предсказанные возможности достижения практически неограниченных скоростей метания тел с помощью электродинамических ускорителей кондукционного типа не подтверждаются на практике. Известно, что одним из основных факторов, препятствующих получению высоких скоростей метания, является накопление в плазменном поршне большого количества “паразитной” массы материала, эродированного с поверхности электродов ускорителя, и вовлечение ее в движение [1]. Кроме того, вследствие наличия сильной электрической эрозии повторное использование ствола исключается (см. [1. С. 195–207]). Эти особенности характерны для рельсовых ускорителей, коаксиальных ускорителей с сильноточным разрядом типа Z-пинч, а также для рассматриваемого в настоящей работе гибридного коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ) [2]. В отличие от рельсовых ускорителей и традиционных Z-пинч-ускорителей гибридный КМПУ более эффективно преобразует электромагнитную энергию в кинетическую энергию метаемого тела (МТ) [3].

Исследования, проведенные на гибридном КМПУ с сильноточным разрядом типа Z-пинч, показали, что при разгоне МТ массой несколько граммов до скорости, равной $2,5 \div 3,0$ км/с, в случае если длина ствола и разрядный ток не превышают 500 мм и 200 кА соответственно, масса эродированного материала достигает значения, равного 35 г. Часть массы в виде металлической плазмы накапливается в плазменном поршне и ускоряется вместе с МТ, т. е. фактически ускоряется масса, на порядок превышающая полезную массу.

Электроэрозионные процессы на поверхности электродов-направляющих в рельсовых электродинамических ускорителях и влияние этих процессов на динамику разгона плазменного поршня изучены в работе [1. С. 160–187, 195–207]. Однако КМПУ имеет существенные отличия от рельсотрона. С помощью КМПУ на поверхность цельнометаллического цилиндрического ствола оказывают тепловое воздействие не только сильные токи, проходящие через опорные дуговые пятна, но и дуговой разряд типа Z-пинч, существующий в ускорительном канале (УК) в течение всего времени работы ускорителя. Согласно результатам исследований, проведенных в режиме ускорения плазмы разряда, такое воздействие оказывает влияние на электроэрозионный износ (см. [1. С. 160–187, 195–207]). Актуальность проведения подобных исследований в режиме ускорения твердых тел обусловлена необходимостью подавления электроэрозионного процесса на поверхности УК КМПУ и увеличения эффективности преобразования электромагнитной энергии в кинетическую энергию МТ.

Исследования проводились с использованием стволов из нержавеющей стали марки 12Х18Н9Т калибром 19 мм и длиной $300 \div 500$ мм. В экспериментах регистрировались разрядный ток $i(t)$ и напряжение $U(t)$ на электродах КМПУ. Подводимая к ускорителю энергия W , определяемая интегрированием кривой мощности, менялась с помощью изменения зарядного напряжения емкостного накопителя энергии U_3 от 3 до 4 кВ и изменения его емкости C от 36 до 48 мФ. Масса металла, эродированного с поверхности УК и вынесенного из ствола струей, определялась взвешиванием ствола до и после выстрела. Характер износа по длине УК изучался путем разрезания отработанного ствола на фрагменты длиной $10 \div 20$ мм, взвешивания их, определения дефекта массы по сравнению с эталонным отрезком, построения и анализа эпюр удельного дифференциального эрозионного износа.

Схема КМПУ представлена на рис. 1. Принцип действия КМПУ описан в [3]. В исходном состоянии вершина центрального электрода 1 (рис. 1,а) соединена с цилиндрической

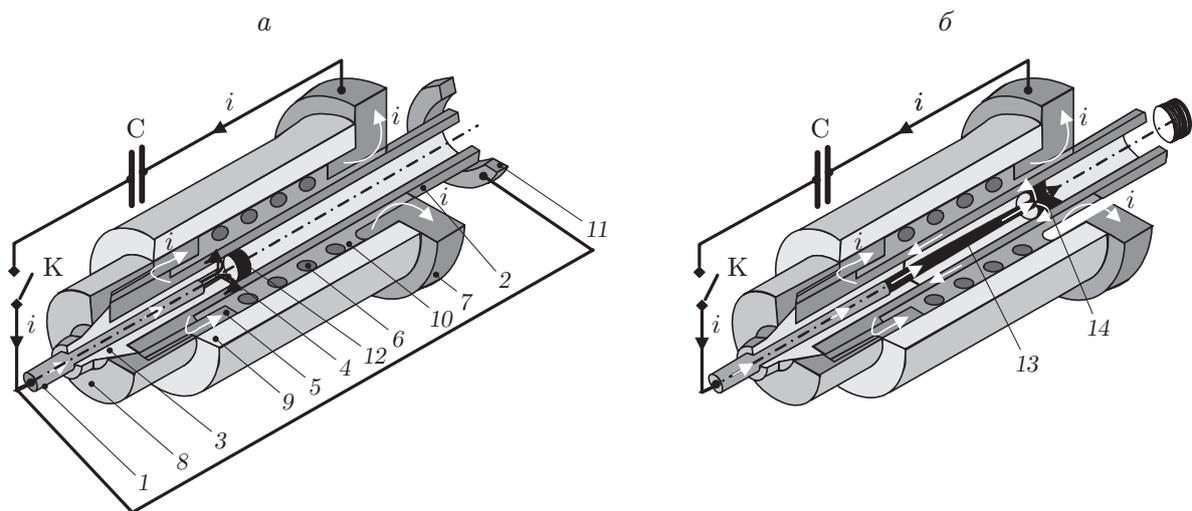


Рис. 1. Схема и принцип действия КМПУ в исходном состоянии (а) и при работе ускорителя (б):

1 — центральный электрод; 2 — электрод-ствол; 3 — изолятор центрального электрода; 4 — электровзрывающиеся проводники; 5–7 — индуктор (5 — контактный цилиндр, 6 — соленоид, 7 — контактный фланец); 8 — заглушка; 9 — корпус; 10 — изоляция (стеклоэпоксидный компаунд); 11 — шунтирующий электрод; 12 — метаемое тело; 13, 14 — плазменная структура сильноточного разряда (13 — плазменный жгут типа Z-пинч, 14 — плазменная перемычка)

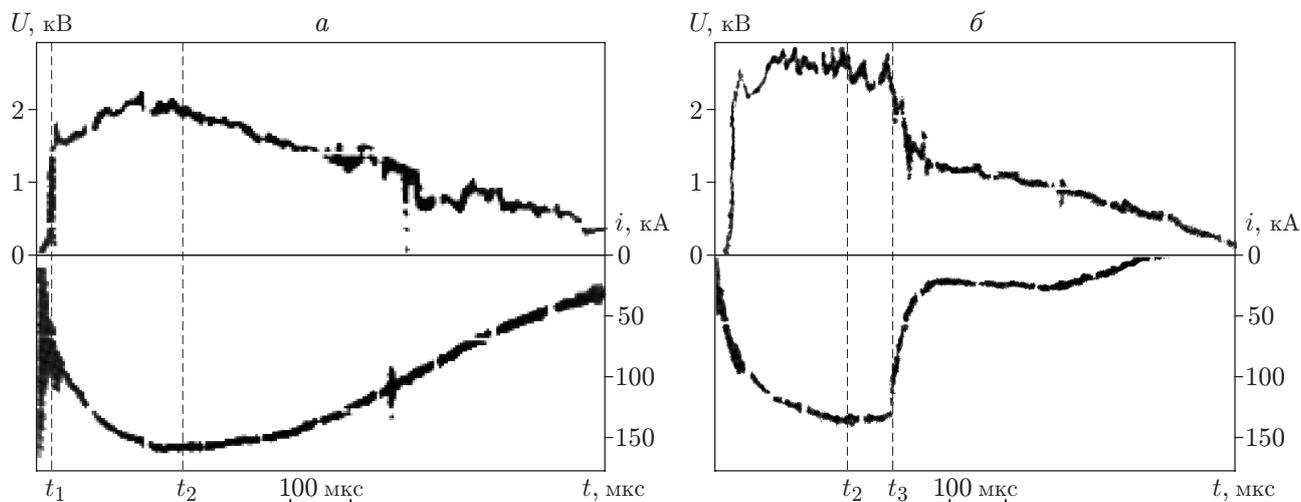


Рис. 2. Осциллограммы напряжения $U(t)$ и тока $i(t)$ на электродах:
 а — напряжение и ток при полном импульсе; б — напряжение и ток при шунтировании разряда в УК

поверхностью УК в начале ствола пучком электровзрывающих проводников 4. Такая конструкция узла центрального электрода и фонтанообразная конфигурация пучка ЭВП обеспечивают формирование плазменной структуры (ПС) сильноточного дугового разряда типа Z-пинч 13 с круговой плазменной перемычкой 14 (рис. 1, б). Для усиления с помощью электротермохимического механизма преобразования энергии стартовой динамики канал в изоляторе вблизи вершины центрального электрода (рис. 1, а) заполнялся водородонасыщенным газогенерирующим веществом — техническим вазелином или трансформаторным маслом.

В момент времени $t = 0$ цепь электропитания замыкается, и по показанному стрелками на рис. 1 контуру начинает протекать разрядный ток $i(t)$ (рис. 2). В момент времени t_1 происходит электровзрыв проводников, сопровождающийся появлением электровзрывного импульса напряжения. Начиная с этого момента работает ускоритель. По мере формирования ПС сильноточного дугового разряда напряжение уменьшается до значения, соответствующего дуговой стадии разряда, и скорость нарастания тока ограничивается. Путем расширения разогретых разрядом газообразных продуктов термического разложения газогенерирующего вещества, в составе которых доля водорода превышает 10 %, задается начальная динамика ускорения круговой плазменной перемычки, за которой находится токоведущий плазменный жгут. Согласно существующим представлениям о конфигурации ПС в коаксиальном Z-пинч-ускорителе предполагается, что устойчивое состояние ПС обеспечивается с помощью азимутального магнитного поля собственного тока, а также аксиального поля соленоида 6 (см. рис. 1) внешней индукционной системы КМПУ. В рассматриваемой коаксиальной магнитоплазменной системе, аналогичной коаксиальному рельсотрону, на плазменную перемычку воздействует ускоряющая электродинамическая сила Лоренца. Высокоэффективное ускорение МТ 12 (см. рис. 1) до сверхзвуковых скоростей происходит в режиме нарастающего тока (см. рис. 2). Выход МТ из ствола начинается в момент t_2 , установленный с помощью высокоскоростной фотосъемки на ВФУ-1.

Для того чтобы замедлить снижение скорости легких полиэтиленовых тел на трассе длиной приблизительно 2,0 м, выстрелы производились при давлении, равном 10^4 Па [4]. Скорость МТ на трассе определялась двумя способами: с помощью рам-мишеней и ВФУ-1. Типичная кинограмма выстрела КМПУ представлена на рис. 3 с шагом по времени

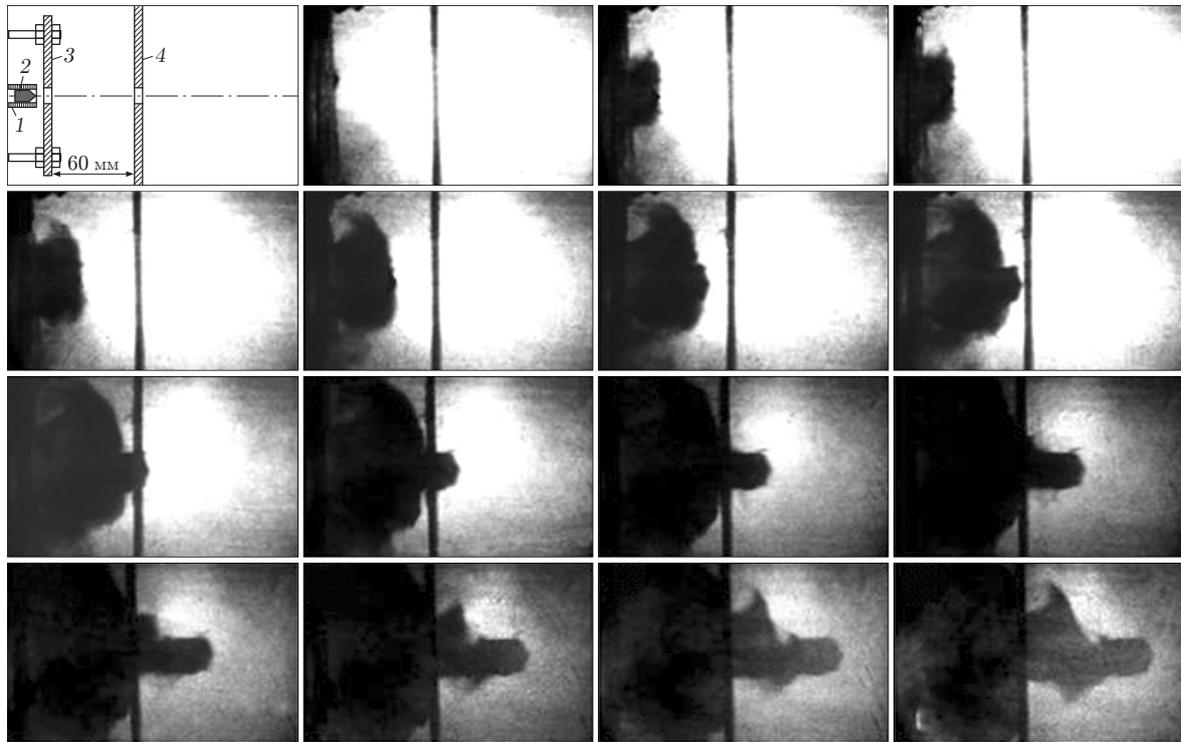


Рис. 3. Схема и кинограмма выстрела КМПУ ($\Delta t = 8,7$ мкс):
 1 — ствол; 2 — МТ; 3 — шунтирующий электрод; 4 — отсекатель

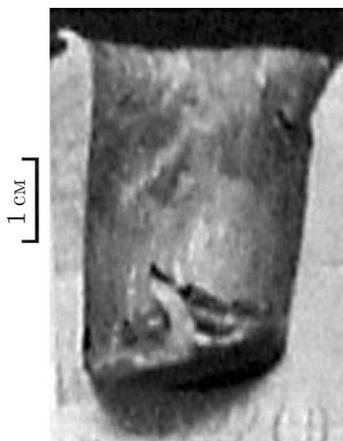


Рис. 4. Кратер в алюминиевой мишени после удара МТ

$\Delta t = 8,7$ мкс (эксперимент соответствует эксперименту 1 в таблице). С помощью достаточно четкого изображения МТ, особенно после прохождения отсекателя 4, можно с высокой точностью определять скорость движения тела. Во всех экспериментах скорости, определенные по кинограммам и по моментам срабатывания рам-мишеней, имеют разброс не более 5 %. На рис. 4 представлена фотография кратера в алюминиевой мишени, образовавшегося после удара МТ (эксперимент соответствует опыту 1 в таблице).

Исходные данные и результаты экспериментов, полученные на ускорителе при различных конструктивных и энергетических параметрах, приведены в таблице. Емкость накопителя энергии C равна 48 мФ, калибр ствола — 19 мм, масса газогенерирующего вещества (технический вазелин) — 0,5 г.

Экспериментальные данные об эрозионном износе ствола при метании твердых тел

Номер эксперимента	Наличие шунтирующего контура	$l_{\text{инд}}$, мм	U_3 , кВ	l_c , мм	m_T , г	v_c , км/с	U_m , кВ	i_m , кА	Δt_{1-2} , мкс	W_{1-2} , кДж	W_k , кДж	η , %	m , г	m/W , г/кДж	W/V , кДж/см ³
1	+	150	3,2	316	17,6	1,03	2,16	183	165	125	9,4	26,5	22,9	0,183	1,328
2	-	300	3,2	491	3,5	2,65	2,32	169	230	186	12,3	18,4	35,1	0,189	1,336
3	-	300	3,1	505	3,5	2,61	1,96	160	235	177	11,9	17,3	30,5	0,172	1,237
4	+	300	3,5	386	3,5	2,34	2,56	159	200	80	9,6	26,1	6,1	0,076	0,693
5	+	300	3,5	515	3,5	2,54	2,68	144	250	111	11,3	19,9	9,0	0,081	0,722
6	+	300	3,5	547	3,5	2,50	2,90	149	270	114	10,9	17,6	9,2	0,080	0,701

Примечание. $l_{\text{инд}}$ — длина индуктора, U_3 — зарядное напряжение, l_c — длина ствола, m_T — масса МТ, v_c — скорость МТ на срезе ствола, U_m — максимальное напряжение, i_m — максимальный ток, Δt_{1-2} — время ускорения, W_{1-2} — энергия ускорения, W — подведенная энергия, W_k — кинетическая энергия МТ, η — КПД системы, m — эродированная масса, m/W — удельная эродированная масса, W/V — удельная подведенная энергия

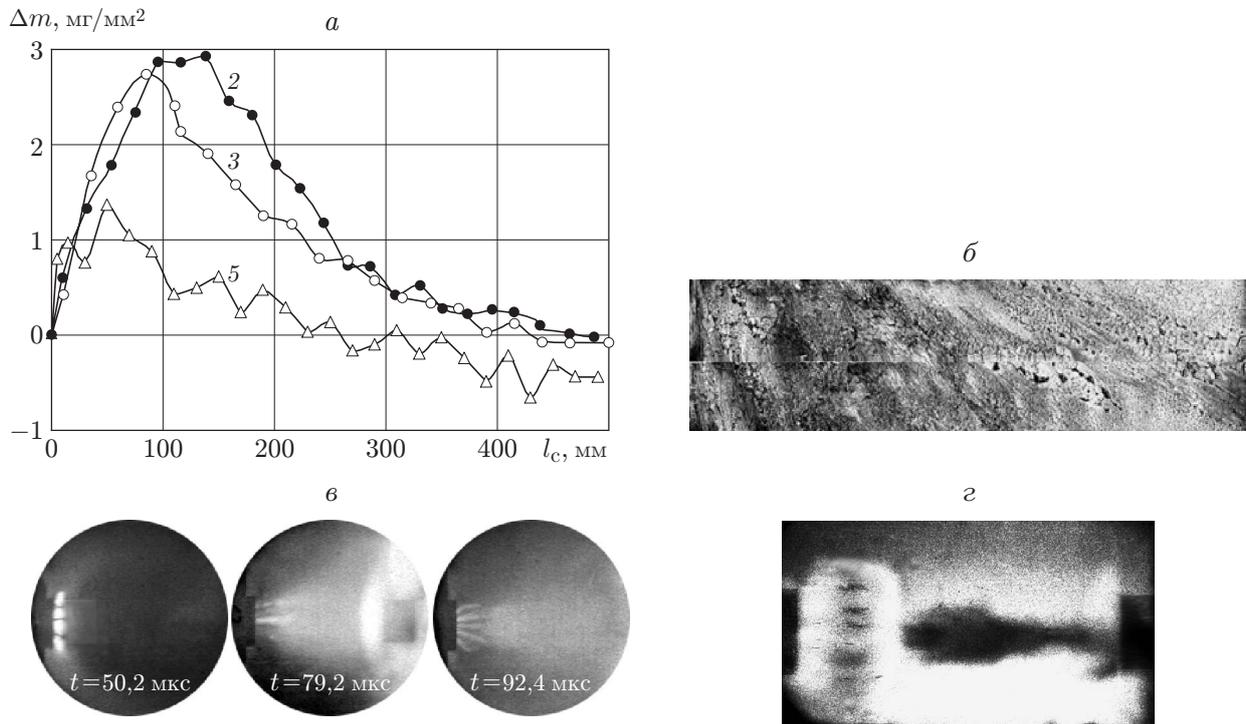


Рис. 5. Результаты экспериментов по исследованию электроэрозионного износа: а — эпюры удельного дифференциального электроэрозионного износа (2, 3, 5 — эксперименты 2, 3, 5 (см. таблицу)), б — фотография плазменно-эрозионного следа поверхности УК, в, г — кинограммы выстрела КМПУ (в — $v_c = 2,5$ км/с; г — $v_c = 0,8$ км/с, $t = 62$ мкс)

Анализ экспериментов 2, 3 (см. таблицу) показывает, что при увеличении подведенной энергии увеличиваются скорость МТ, кинетическая энергия и эффективность преобразования энергии. Следует отметить, что на ускорение МТ расходуется только та часть подведенной к ускорителю энергии, которая выделяется до момента выхода МТ из ствола, т. е. на интервале времени $\Delta t_{1-2} = t_2 - t_1$.

На рис. 5,а приведены эпюры удельного дифференциального электроэрозионного износа поверхности УК по длине ствола $\Delta m(l_c)$. Номера кривых на рис. 5 соответствуют номерам экспериментов в таблице. Поведение эпюр $\Delta m(l_c)$ при метании твердых тел аналогично поведению эпюр при ускорении плазмы разряда ($m_T = 0$) [5]. Сравнение эпюр 2 и 3, а также данных таблицы показывает, что увеличение подводимой к ускорителю энергии обуславливает увеличение массы эродированного материала. В [5] показано, что наиболее существенным фактором, определяющим величину эрозионного износа, является значение данной энергии. Следовательно, часть энергии, выделяющейся после выхода МТ из ствола, является “паразитной”, ее необходимо направлять в другую цепь. Данную операцию можно осуществить с помощью системы шунтирования разряда в ускорителе и путем отсечки хвостовой части импульса тока. Система шунтирования обеспечивает быструю (менее чем за 100 мкс) отсечку хвостовой части импульса тока после выхода МТ из ствола и его переключения в параллельную цепь либо в возможную вторую ступень ускорения.

На рис. 2,б показаны осциллограммы напряжения $U(t)$ и тока $i(t)$ в режиме работы КМПУ с шунтированием разряда после выхода его головной части из ствола. Сравнение результатов экспериментов показывает, что при использовании системы шунтирования энерговыделение в УК и, следовательно, эрозионный износ ствола КМПУ при сохранении динамических параметров метания уменьшаются. По характеру эпюр $\Delta m(l_c)$ (см. рис. 5,а)

также можно судить о степени неравномерности износа материала по длине ствола. На рис. 5,а видно, что при увеличении подводимой к ускорителю энергии возрастает максимальное значение эрозионного износа, и его экстремум смещается в направлении движения МТ. Кроме того, при увеличении подводимой энергии увеличивается длина эродированного участка ствола. На эпюрах $\Delta m(l_c)$ имеются участки, на которых значения Δm отрицательные, что свидетельствует о наслоении эродированного материала на поверхность ствола, не подвергшуюся эрозии. По-видимому, причиной наслоения является постоянное уменьшение промежутка времени, за который плазменная перемычка проходит через единичную поверхность, вследствие чего уменьшаются величина энергии, выделившейся на контактной поверхности УК, и масса металла, перешедшего в фазу расплава в опорном пятне. На этом характерном участке время становится меньше времени, необходимого для плавления металла (см. [1. С. 160–187]). Кроме того, причиной отсутствия эрозии может являться уменьшение плотности тока в ПС вследствие деградации ее устойчивого состояния и ее быстрого расширения под действием нескомпенсированного внутреннего газокинетического давления на выходе из зоны, охваченной соленоидом.

На рис. 5,б представлена фотография плазменно-эрозионного следа на поверхности УК. Видно, что износ материала по длине ствола неравномерен, происходит в многочисленных дискретных треках, угол наклона которых максимален в начале ствола и вследствие увеличения скорости плазменной перемычки уменьшается по его длине, поскольку плазменная перемычка высоковольтного сильноточного дугового разряда типа Z-пинч не является сплошным проводящим диском, а состоит из радиальных дискретных каналов проводимости. Этот факт подтверждают кинограмма движения МТ за срезом ствола (см. рис. 3) и полученная при большей скорости МТ (2,5 км/с) кинограмма (см. рис. 5,в): четко видны ярко светящиеся дискретные струи, из которых состоит плазменная перемычка. На рис. 5,г, соответствующем движению МТ за срезом ствола при меньшей скорости (0,8 км/с), заметна фонтанообразная форма ПС дугового разряда типа Z-пинч.

Анализ экспериментов 4–6 (см. таблицу) показывает, что увеличение длины ствола с 386 до 547 мм обуславливает незначительное повышение скорости МТ. Однако при этом увеличиваются подведенная энергия и масса эродированного материала, вследствие чего существенно снижается КПД системы. В опытах 1 и 4, в которых метались тела различной массы (17,6 и 3,5 г), при длине ствола менее 400 мм КПД преобразования электромагнитной энергии в кинетическую имеет максимальное значение.

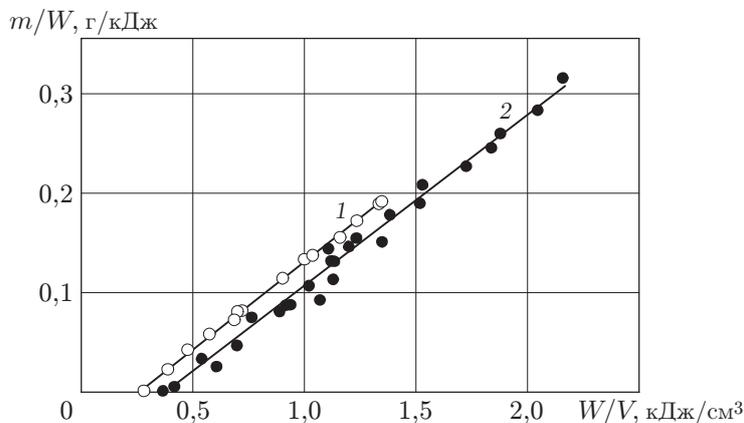


Рис. 6. Зависимость удельной электроэрозионной массы m/W от удельной подведенной энергии W/V :

1 — при ускорении МТ; 2 — при ускорении плазмы

Из результатов многочисленных экспериментов по ускорению макротел следует, что величина подведенной энергии оказывает влияние на величину интегрального эрозионного износа, аналогичное влиянию, оказываемому при ускорении плазмы разряда массой $m/W = f(W/V)$ [5]. На рис. 6 приведена зависимость удельной электроэрозионной массы m/W от удельной подведенной энергии W/V (на единицу объема УК). Зависимость 1 соответствует износу в режиме работы КМПУ при ускорении МТ, зависимость 2 — износу в режиме ускорения плазмы [5]. Экспериментальные точки в этой системе координат аппроксимируются линейной функцией. При этом прямая 1 проходит немного выше прямой 2. Следует отметить, что эрозионный износ ствола в опыте 1 (см. таблицу) с большей массой МТ также соответствует зависимости 1. По-видимому, увеличение износа ствола при наличии МТ обусловлено существенным уменьшением скорости течения плазмы за МТ и увеличением давления в стволе и температуры. Также при наличии МТ возможно повышение плотности тока в радиальных дискретных каналах проводимости, что обусловлено более компактным расположением плазменной перемычки, так как ее передняя часть прижата к ускоряемому телу.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Материалы** 1-го Всесоюзного семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле, Новосибирск, 10–13 апр. 1990 г. / Под ред. М. Ф. Жукова. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1990.
2. **Пат. 2150652 РФ, 7 F 41 B 61/00.** Коаксиальный ускоритель Сивкова / А. А. Сивков. Заявл. 24.02.99; Оpubл. 10.06.00, Бюл. № 16.
3. **Сивков А. А.** Гибридная электромагнитная система метания твердых тел // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 1. С. 3–12.
4. **Баллистические** установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Под ред. Н. А. Златина, Г. И. Мишина. М.: Наука, 1974.
5. **Сивков А. А., Герасимов Д. Ю., Цыбина А. С.** Электроэрозионная наработка материала в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе для нанесения покрытий // Электротехника. 2005. № 6. С. 25–33.

*Поступила в редакцию 14/II 2011 г.,
в окончательном варианте — 14/IV 2011 г.*