

03;05

©1994 г.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ В СИЛЬНОТОЧНОМ РЕЖИМЕ

*А.И.Павловский, Л.Н.Пляшкевич, А.М.Шувалов, А.Я.Бродский*

Приведены результаты экспериментальных исследований разрушения импульсом тока конденсаторной батареи кумулятивных струй, образуемых зарядами с воронками диаметром 45 и 100 мм. Приведены рентгеновские снимки процесса разрушения головной части струи. В некоторых случаях удавалось добиться полного разрушения струи. Наклон струи к плоскости электродов ухудшает и делает нестабильным создание устойчивой токовой цепи в начале процесса.

Физическая картина процесса разрушения электрическим током металлических кумулятивных струй (КС) [1-3], образующихся при взрыве кумулятивных зарядов [4], отлична от процессов разрушения током струй жидких металлов и твердых проводников [5]. В режиме умеренных токов целью таких экспериментов может быть оптимизация токового генератора при некоторых допустимых пределах глубины проникновения КС в металлическую преграду, а при сильных токах — минимизация глубины проникновения. В настоящей работе приведены результаты экспериментов по разрушению КС в сильноточном режиме, основное внимание уделялось изучению разрушения головной части струи при взаимодействии ее с различного характера металлическими преградами.

Схема использованной в опытах установки приведена на рис. 1. Она аналогична описанной в [1], где описаны также использованные кумулятивные заряды. Часть преграды толщиной  $S$  (рис. 1) в опытах менялась. Результаты экспериментов приведены в таблице, где указаны емкость  $C$  питающей конденсаторной батареи,  $U_c$  — напряжение зарядки батареи,  $I_{\max}$  — ток в максимуме,  $T$  — время нарастания тока от нуля до максимума, толщина  $S$ , средняя плотность преграды  $\rho_{\text{ср}}$  на участке  $S$ .

Опыты 1-10 проводились с зарядом с воронкой диаметром 45 мм,  $\Phi = 55$  мм,  $H = 30$  мм; опыты 11, 12 — с зарядом с воронкой 100 мм,  $\Phi = 115$  мм,  $H = 45$  мм. Некоторые полученные в этих опытах зависимости тока в КС  $I(t)$  и сопротивления  $R(t)$  участка цепи между электродами 3 и 4 приведены на рис. 2.

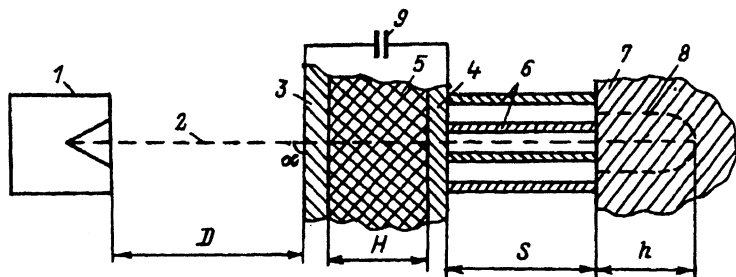


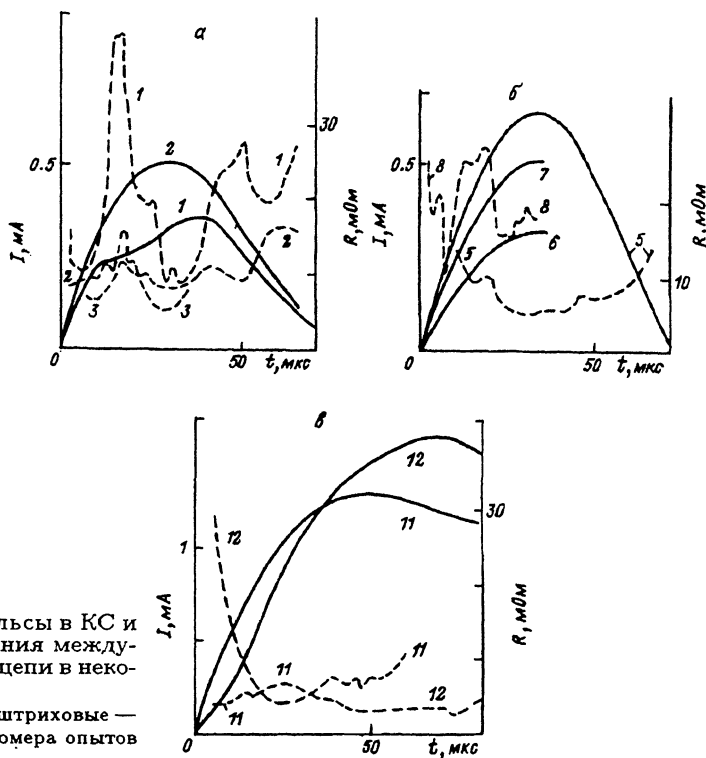
Рис. 1. Электроимпульсная установка для исследования разрушения КС импульсом тока.

1 — кумулятивный заряд; 2 — КС; 3, 4 — электроды; 5 — изолятор; 6 — вставка (металлические пластины или легкий металл); 7 — металлическая преграда; 8 — каверна в преграде; 9 — конденсаторная батарея;  $\alpha$  — угол наклона КС к плоскости электродов (обычно  $\alpha = 90^\circ$ , в некоторых опытах  $\alpha = 30^\circ$ ).

В опыте 1 пространство  $S$  занято воздушным промежутком, а электрод 4 размещен непосредственно на преграде-сборнике 7, так что расстояние между электродами в опыте увеличено по сравнению с [1] до 110 мм. Без тока в этой геометрии глубина каверны составила  $\sim 150$  мм. Из рис. 2 видно, что происходят большие скачки сопротивления, нарушающие форму токового импульса и снижающие его амплитуду. При разрушении КС контакты между отдельными стратами поддерживаются дугowymi разрядами. Возникшая область сильного разрушения дает увеличение сопротивления. Она сносится движением КС по направлению к преграде, и сопротивление вновь уменьшается, затем может возникнуть следующая такая область, и т.д. В результате в опыте глубина каверны возросла с 50 до 65 мм.

С целью получения возможности осуществления контакта КС с боковой поверхностью каверны при сильном разрушении струи были проведены опыты 2-4, где пространство  $S$  заполнялось соответственно дюралем, порошком меди, пористым алюминием, полученным методами порошковой металлургии. В таблице приведены значения полученных при этом каверн в стальной преграде. В опыте 4 кривая тока имеет

Номер опыта	$C$ , мкф	$U_c$ , кВ	$S$ , мм	$\rho_{cp}$ , г/см <sup>3</sup>	$I_{max}$ , МА	$T$ , мкс	$h$ , мм
1	900	20	80		0.36	38	65
2	900	20	80	2.7	0.51	30	15
3	900	20	80	1.4	0.43	30	23
4	900	20	80	1.2	0.38	38	37
5	900	25	150	0.9	0.65	32	50
6	900	20	150	1.8	0.33	32	20
7	900	25	150	1.8	0.52	32	3-5
8	900	25	150	0.2	0.56	32	3-5
9	900	20	150	0.2	0.47	32	10
10	900	25	150	1.8	0.47	35	3-5
11	6000	21	200	0.3	1.32	50	110
12	6000	21	200	2.6	1.6	68	3-40



**Рис. 2.** Токовые импульсы в КС и изменение сопротивления междуэлектродного участка цепи в некоторых опытах. Сплошные линии —  $I(t)$ , штриховые —  $R(t)$ . Цифрами указаны номера опытов согласно таблице.

такую же форму, как и в опыте 1. Сопротивление в этом опыте еще выше, чем в опыте 1, что, по-видимому, объясняется большим диаметром каверны в пористом алюминии и невысокой его проводимостью.

В опытах 5–12 пространство  $S$  было заполнено стопкой металлических пластин, расположенных параллельно струе, с воздушным зазором между ними. С бокового ребра пластин проводилась рентгеновская съемка находящейся под током струи. В опыте 5 использованы медные пластины толщиной 1 мм, расположенные с зазором 10 мм, моменты съемки отмечены на кривой 5 (рис. 2), полученные снимки представлены на рис. 3.

На рис. 3,а видны начальные стадии разрушения КС. При установлении контакта соседние со струей пластины начинают раздвигаться пондеромоторными силами. Несколько таких раздвижек, видных на снимке, свидетельствуют о перескоках точки контакта и нерегулярностях в разрушении отдельных частей струи. Части струи, оставшиеся неразрушенными, и образовали в итоге каверну. Как видно из рис. 2,б,в, в дальнейшем зона разрушения переместилась в пространство между электродами.

В опытах 6,7 использовались те же пластины с зазором 5 мм. Уменьшение зазора улучшило контакт струи с пластинами. На рис. 3,б, сделанном в опыте 6 спустя 15 мкс после начала разряда батареи на КС, видно, что только небольшая часть струи осталась неразрушенной (отмечена стрелкой), а остальная струя разрушается в зоне вблизи электродов. Глубина каверны существенно сократилась. Скачок сопроти-

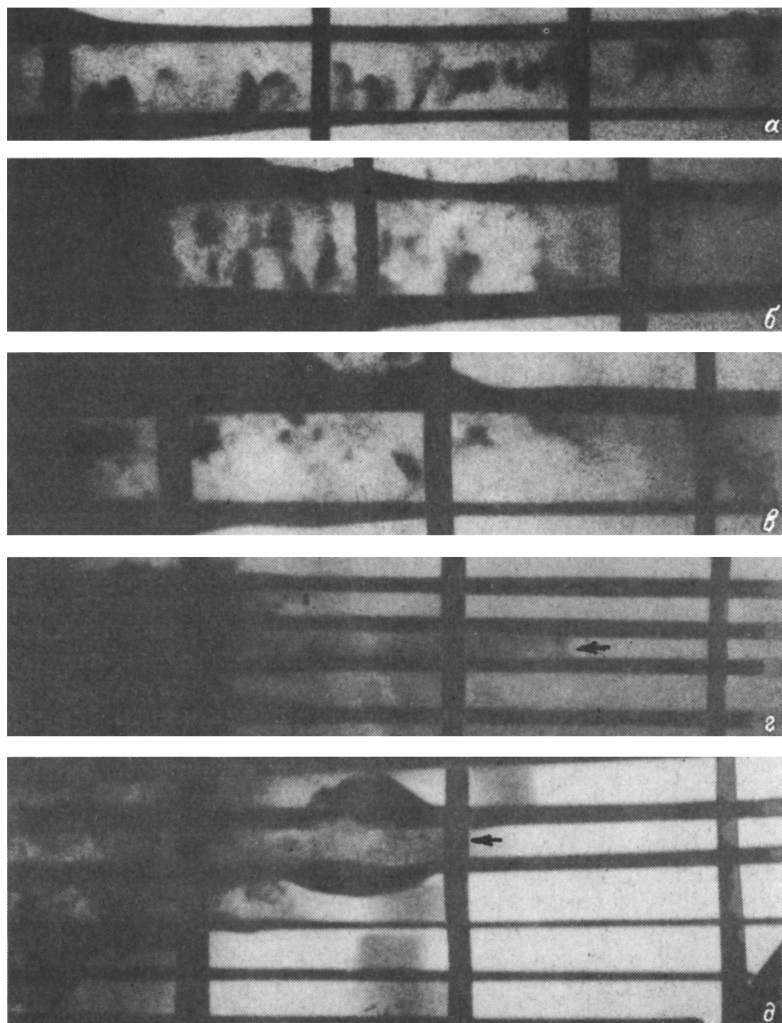


Рис. 3. Рентгеновские снимки разрушения КС.

Стрелками показано положение головной части. *a* — опыт 5 (см. таблицу), время 25 мкс от начала разряда батареи; *б* — 5, 35 мкс; *в* — 5, 45 мкс; *г* — 6, 15 мкс; *д* — 10, 24 мкс.

вления на кривой *б* (рис. 2) по времени примерно соответствует отрыву этой видимой на снимке неразрушенной части струи. При повторении (опыт 7) с повышенным током на снимках не было видно никаких неразрушенных частей струи, а размеры зоны ее разрушения занимали не более 30 мм длины пластин. Сокращение в этом опыте размера *S* до  $\sim 40$  мм, по-видимому, не повлияло бы на результат опыта, в котором произошло полное разрушение струи. Каверна фактически отсутствовала, на поверхности стали остались только отдельные ямки глубиной 3–5 мм (рис. 4, *a*).

Замена материала пластин на алюминиевую фольгу толщиной 0.2 мм (зазор 3 мм) в опыте *г* хотя и дала увеличение сопротивления,



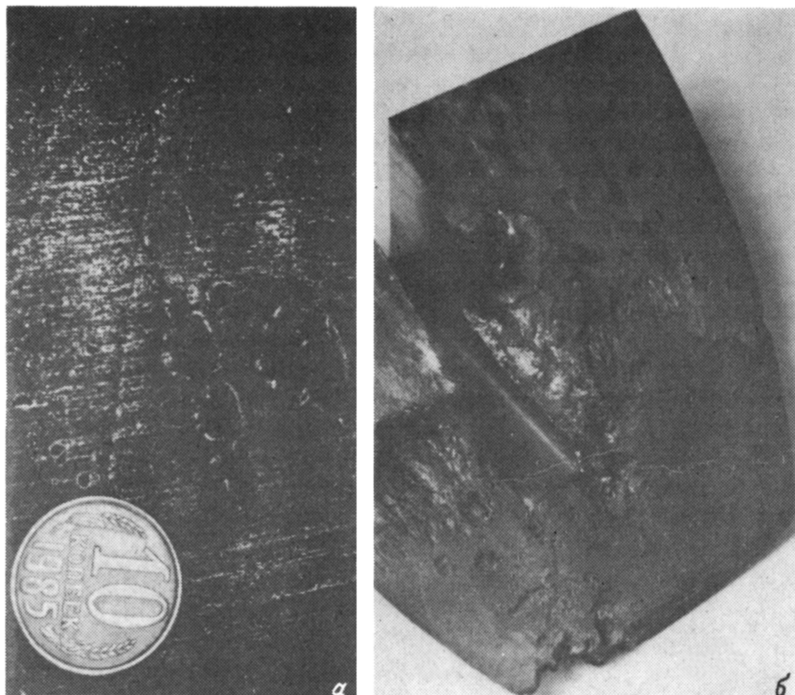


Рис. 4. Поверхность преграды после опыта.

*a* — опыт 7 (согласно таблице), *b* — опыт 12; сделан частичный разряд каверны, поверхность преграды наклонена под углом  $30^\circ$  к горизонту, направление КС — в горизонтальной плоскости.

однако струя также разрушилась полностью. При некотором уменьшении тока (опыт 9) глубина каверны составила  $\sim 10$  мм.

Условия возникновения пробоя промежутка между краями отверстия, пробиваемого струей в электроде 3, и самой КС специально не исследовались, и вопрос минимизации сопротивления возникающего дугового разряда, замыкающего электрическую сеть между электродами, не рассматривался. Однако в некоторых опытах снижение сопротивления промежутка до некоторой установившейся величины на начальном этапе роста тока происходило с запаздыванием, поэтому пришлось увеличить толщину электрода с 1.5 до 3 мм. Еще более заметны это запаздывание и его нестабильность от опыта к опыту, когда угол  $\alpha$  наклона КС к поверхности электродов отличен от  $90^\circ$ , поскольку направление скорости откольных частиц нормально к поверхности электрода и часть из них в этом случае взаимодействует со струей. Такое повышенное вначале сопротивление цепи в межэлектродном промежутке отмечалось в опыте 10 при  $\alpha = 30^\circ$  (пластины медные, толщина 1 мм, зазор 5 мм), что удлинено зону разрушения струи до  $\sim 80$  мм вдоль пластин (рис. 3, *d*), однако КС также была полностью разрушена.

В опыте 11 с зарядом с воронкой 100 мм использованы алюминиевые пластины толщиной 1 мм, длиной 200 мм с зазором 10 мм. В такой геометрии без тока глубина каверны составила 450 мм, а в опыте составила всего 110 мм. В опыте 12 использованы медные пластины толщиной 1 мм, зазор 3 мм, угол  $\alpha = 30^\circ$ . В начальный период роста

тока высокое сопротивление более чем на 10 мкс задержало начало эффективного разряда батареи, за это время головная часть струи продвинулась вдоль пластин более чем на 80 мм. Однако в дальнейшем сопротивление установилось примерно вдвое ниже, чем в предыдущем опыте, что увеличило амплитуду тока. Оставшейся длины пластин хватило, чтобы почти полностью разрушить головную часть струи. Фотография каверны (с частичным разрезом) приведена на рис. 4. Глубина каверны видна на плоскости разреза: в нижней части ~ 40 мм, в верхней части ~ 3–5 мм.

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность полного разрушения КС. Наклон КС к плоскости электродов увеличивает нестабильность в процессе начала создания устойчивой токовой цепи. Необходимы дальнейшие исследования влияния различных факторов на процесс токового разрушения КС на его различных фазах.

Авторы признательны Г.А.Шведову и А.Д.Матросову за полезные обсуждения экспериментальных исследований.

### Список литературы

- [1] Пафловский А.И., Пляшкевич Л.Н., Шувалов А.М., Бродский А.Я. // ЖТФ. В печати.
- [2] Яневич Г.Н., Баланкин А.С., Любомудров А.А., Северюков И.Т. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 8. С. 201–204.
- [3] Pollock C.E. // 6<sup>th</sup> Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Albuquerque (USA), 1992.
- [4] Кинеловский С.А., Тришин Ю.А. // ФГВ. 1980. Т. 16. № 5. С. 26–39.
- [5] Абрамова К.Б., Златин Н.А., Перегуд В.П. // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. С. 2007–2022.

Поступило в Редакцию  
24 ноября 1992 г.  
В окончательной редакции  
12 апреля 1993 г.