

РАЗРУШЕНИЕ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ ТОКОМ

Л. Н. Пляшкевич, А. М. Шувалов, Г. М. Спилов, А. Я. Бродский,
Е. М. Димант, Н. Б. Лукьянов, Б. С. Макаев, А. Г. Репьев,
С. В. Гайдаш, А. С. Зайцев

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, plyashkevich@ntc.vniief.ru

В проведенных ранее авторами экспериментах по разрушению металлических кумулятивных струй током конденсаторной батареи было достигнуто практически полное разрушение всей струи. При этом кумулятивный заряд располагался от токовых электродов на расстоянии, примерно равном диаметру кумулятивной воронки. Физическая картина разрушения струи в сильноточном режиме заключалась в первоначальном развитии в струе МГД-неустойчивостей в виде роста шеек и их последующего электрического взрыва. В настоящей работе описаны такие же эксперименты при увеличении расстояния между кумулятивным зарядом и электродами. Показано, что результаты разрушения кумулятивной струи при этом могут ухудшаться, поскольку изменение начального состояния струи меняет физическую картину процесса ее разрушения током.

Ключевые слова: кумуляция, кумулятивная струя, конденсаторная батарея, МГД-неустойчивость, электрический взрыв проводника, импульс электрического тока.

Изучению физических аспектов воздействия импульсного электрического тока на металлические кумулятивные струи посвящено достаточно много работ, однако механизм разрушения кумулятивных струй током изучен все еще недостаточно, что обусловлено сложностью процесса и более высокими затратами на проведение экспериментов по сравнению, например, с аналогичными экспериментами с взрывающимися проводниками.

В качестве источника тока в подобных исследованиях используется конденсаторная батарея, подключенная к двум плоским металлическим электродам. Кумулятивная струя, пробивая эти электроды, замыкает разрядный контур, и по струе начинает течь ток. На рис. 1 приведены варианты принципиальной схемы таких экспериментов, использованные в работах [1–9].

В варианте рис. 1, *а* ток протекает только по участку кумулятивной струи, находящемуся между электродами. Поэтому этот вариант дает наихудшие результаты по снижению глубины внедрения струи в преграду. Зато в этой постановке можно проводить рентгеновскую съемку струи, выходящей из межэлектродного промежутка, и наблюдать результаты воздействия тока на нее. Почти все такие снимки, приведенные в [1–9], выполнены с использованием заряда с кумулятивной воронкой

диаметром $40 \div 45$ мм (только такой заряд будем рассматривать далее), но были использованы и заряды с диаметром воронки ≈ 100 мм [2].

Более эффективна схема, показанная на рис. 1, *б*. Здесь кумулятивная струя, выходя из

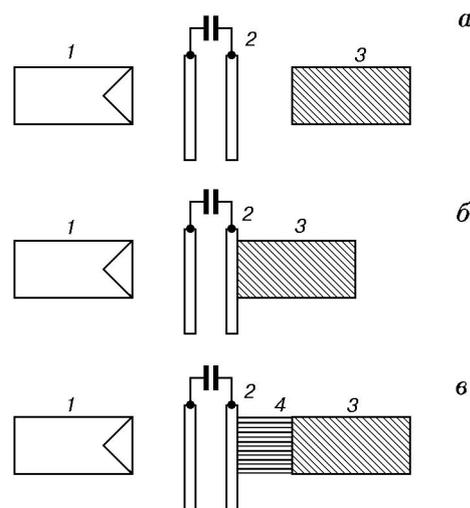


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 — кумулятивный заряд, 2 — металлические плоские электроды, подсоединенные к конденсаторной батарее, 3 — металлическая (Ст. 3) преграда, 4 — стопка тонких металлических пластин, разделенных воздушными промежутками

межэлектродного пространства, сразу внедряется в преграду, образуя в ней каверну, служащую обратным токопроводом по отношению к струе. В результате длина участка кумулятивной струи, находящегося под током, увеличивается, увеличивается также и время воздействия тока на элементы струи. В экспериментах по такой схеме достигнуто максимальное сокращение глубины внедрения струи в преграду h : с ≈ 200 мм без тока до ≈ 50 мм с током [1, 2]. Однако дальнейшее снижение h в такой схеме затруднительно, поскольку при замыкании кумулятивной струей межэлектродного промежутка ток начинает возрастать по синусоидальному закону, и головная часть струи внедряется в преграду, не успев получить критического воздействия.

В [9] предложен вариант схемы (рис. 1, в), в которой между электродами и преградой размещается стопка тонких металлических пластин, разделенных воздушными промежутками. В результате головная часть кумулятивной струи, пройдя электроды, продолжает оставаться под током и при прохождении между этими пластинами. Струя при амплитуде тока $500 \div 550$ кА уничтожалась практически полностью: $h \approx 10 \div 15$ мм или каверна отсутствовала совсем [9].

Во всех вышеупомянутых экспериментах кумулятивный заряд располагался довольно близко от электродов (на расстоянии $1 \div 2$ диаметров воронки), кумулятивная струя была еще не сильно растянутой и не имела шеек. Под воздействием тока в такой струе сначала формируются шейки, затем — дискообразные страты, увеличивающие диаметр струи в 3–4 раза. При этом аксиальная симметрия струи приблизительно сохраняется. Затем наступает электрический взрыв шеек, достаточно сильный, чтобы разрушать соседние участки струи.

Однако с увеличением расстояния между зарядом и электродами кумулятивная струя подходит к электродам более растянутой и деформированной. На ней заметно образование шеек. На рис. 2 приведен снимок струи, полученный в момент, когда ее «носик» удалился от заряда на расстояние ≈ 300 мм (примерно 30 мм струи вышло за пределы кадра). Форма струи уже сильно изменена, образовались достаточно тонкие шейки, причем заметно нарушена аксиальная симметрия струи. Однако струя еще сплошная и сохраняет заметную про-

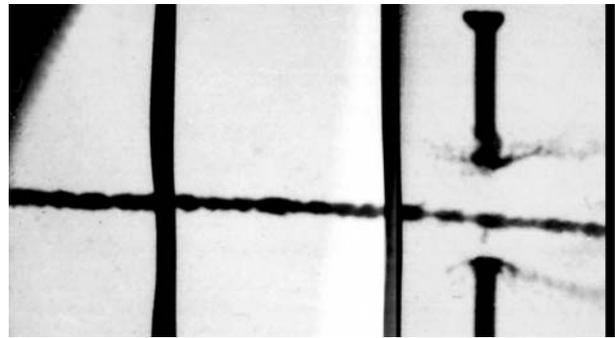


Рис. 2. Кумулятивная струя использовавшегося в опытах заряда с воронкой диаметром 45 мм на удалении ≈ 300 мм от заряда:

головная часть длиной ≈ 30 мм вышла за пределы кадра; диаметр гвоздя 3,3 мм; вертикальные полосы — защита кассеты

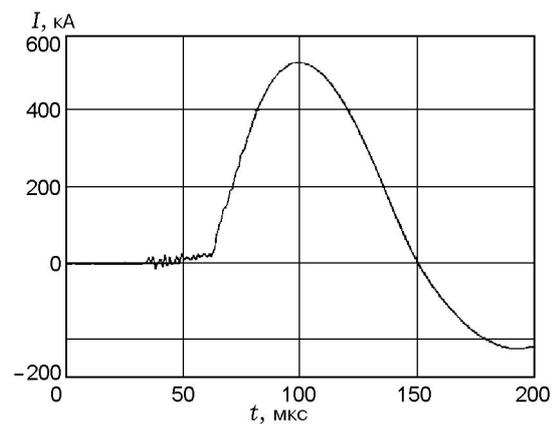


Рис. 3. Изменение тока в одном из опытов

бивную способность.

Казалось бы, наличие таких тонких шеек должно облегчать разрушение кумулятивной струи током. Однако в наших опытах с такими растянутыми струями результаты были хуже, чем при меньших расстояниях от заряда до электродов. Не было полного разрушения струи, результаты экспериментов с такими струями, проведенные по схеме рис. 1, в, были сравнимы с аналогичными результатами опытов по схеме рис. 1, а.

В настоящей статье описано несколько опытов, проведенных для сравнения характера токового разрушения кумулятивных струй при разной степени их деформации, т. е. при различных расстояниях от заряда до электродов.

В опытах использовались такие же, как в [8, 9], заряды с диаметром кумулятивной ворон-

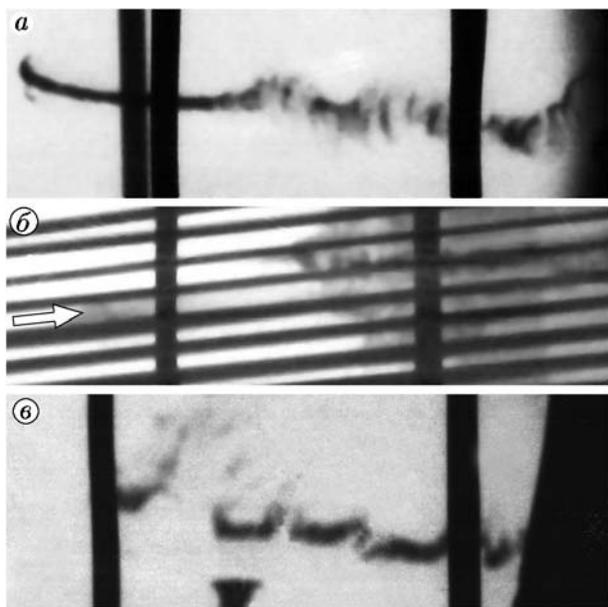


Рис. 4. Рентгеновские снимки, полученные в опытах:

струя движется справа налево, *a* — расстояние между зарядом и электродами 160 мм, схема рис. 1, *a*; *б* — расстояние 160 мм, схема рис. 1, *б*, стрелкой показано положение оставшегося неразрушенным элемента головной части кумулятивной струи; *в* — расстояние 220 мм, схема рис. 1, *a*

ки 45 мм, но отличающиеся тем, что взрывчатое вещество в них было менее мощным. В результате пробивная способность кумулятивной струи была снижена: $h = 170, 145$ и 130 мм при расстоянии заряд — преграда 55, 160 и 220 мм соответственно. Деформация струи при ее растяжении была заметной.

Использовалась конденсаторная батарея емкостью 1200 мкФ, заряжаемая до 20 кВ. Изменение тока в одном из опытов показано на рис. 3. Амплитуда тока в опытах составляла $520 \div 560$ кА.

Сравнивались данные экспериментов, проведенных по схемам рис. 1, *a* и рис. 1, *б*. В опытах использовались электроды из алюминия толщиной 4 мм и шириной 80 мм, расположенные с зазором 20 мм. Полученные в опытах снимки приведены на рис. 4. На снимке 4, *a* (схема рис. 1, *a*) на передних участках кумулятивной струи, выходящей из межэлектродного промежутка, уже заметны шейки, образованные не током, а растяжением струи. Хорошо видны элементы, где шейки сжимаются током, далее по струе идет зона образования дискообразных страт. Видно, что асимметричность

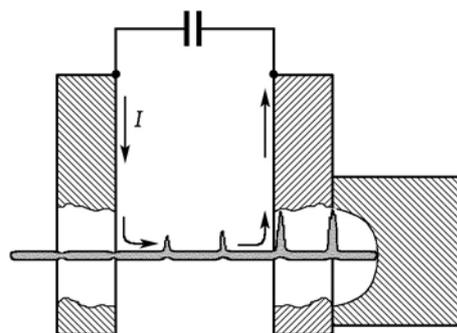


Рис. 5. Схема, иллюстрирующая влияние радиальных выбросов металла, образующихся на струе, на функционирование экспериментальной установки

струи, вызванная асимметричностью образующихся при ее растяжении шеек, под действием тока существенно увеличивается, однако не настолько сильно, чтобы вносить осложнения в эксперимент. В этом опыте $h = 48$ мм.

На снимке 4, *б* (схема рис. 1, *б*, блок алюминиевых пластин толщиной 1 мм и длиной 120 мм, расположенных с шагом 4 мм) виден только один небольшой оставшийся неразрушенным элемент головной части струи, который более других углубился в преграду — на $6 \div 7$ мм. Фактически каверна в преграде отсутствует.

Очень интересен снимок, приведенный на рис. 4, *в* (схема рис. 1, *a*). При расстоянии между зарядом и электродами 220 мм шейки между элементами кумулятивной струи становятся достаточно тонкими, так что их электрический взрыв возможен уже в головных элементах струи. Поскольку шейки тонкие, взрывы не разрушают соседних участков струи. Из-за начальной асимметрии шеек эти взрывы вызывают довольно длинные радиальные выбросы металла, а дисков не образуют. В опыте $h \approx 40 \div 45$ мм. В аналогичном опыте по схеме рис. 1, *б* остаются неразрушенными несколько элементов струи и глубина каверны примерно такая же: $h \approx 40$ мм.

При расстоянии 280 мм от заряда до электродов в опыте по схеме рис. 1, *a* струя оказалась сильно разрушенной, но каверна все же заметна: $h = 35$ мм. В аналогичном опыте по схеме рис. 1, *б* такая струя эффективно разрушается, каверна в преграде отсутствует, на поверхности преграды есть только очень мелкие ямки.

Проведенные эксперименты показывают, что начальная форма кумулятивной струи, падающей под действием тока, существенно влияет на физическую картину процесса ее разрушения. Развивающиеся под действием тока радиальные выбросы металла от шейки, достигая соседней токоведущей пластины, шунтируют ту часть струи, которая находится впереди этой шейки, ток в ней быстро затухает. Такие выбросы могут развиваться и на участках струи, еще находящихся между электродами. Они могут шунтировать выходной электрод (рис. 5). В этом случае схемы рис. 1, б, в становятся идентичными рис. 1, а и эффективность разрушения струи ухудшается.

В дальнейшем необходимо более детальное исследование процессов разрушения кумулятивной струи током при различной степени ее растяжения и деформации, а также разработка способов защиты от воздействия радиальных выбросов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shvetsov G. A., Matrosov A. D., Pavlovskii A. I. Current instability of shaped-charge jets // Proc. of the 10th Intern. Pulsed Power Conf. 1995. P. 1136–1141.
2. Швецов Г. А., Матросов А. Д. Экспериментальное исследование токовой неустойчивости кумулятивных струй // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения. Саров: ВНИИЭФ, 1997. С. 979–986.
3. Бабкин А. В., Кружков В. А., Ладов С. В. и др. Поведение металлических струй под действием импульса тока // Там же. С. 992–997.
4. Швецов Г. А., Матросов А. Д., Бабкин А. В. и др. Поведение металлических кумулятивных струй при пропускании по ним импульсного электрического тока // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 3. С. 19–25.
5. Федоров С. Ф., Бабкин А. В., Ладов С. В. и др. О возможностях управления кумулятивным эффектом взрыва с помощью электромагнитных воздействий // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 6. С. 126–145.
6. Shvetsov G. A., Matrosov A. D., Babkin A. V., et al. Disruption of shaped-charge jets due to axial current // Proc. of the 18th Intern. Symp. on Ballistics. San Antonio, TX, USA, 1999. V. 1. P. 581–587.
7. Pollock C. E. Electromagnetic effects of the natural hydrodynamic instability of stretching, high velocity, metallic jets // Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications. New York: Nova Sci. Publ., 1994. P. 309–316.
8. Павловский А. И., Пляшкевич Л. Н., Шувалов А. М., Бродский А. Я. Экспериментальные исследования разрушения кумулятивной струи импульсом тока // Журн. техн. физики. 1994. Т. 64, № 2. С. 76–82.
9. Павловский А. И., Пляшкевич Л. Н., Шувалов А. М., Бродский А. Я. Исследование некоторых особенностей разрушения кумулятивной струи в сильноточном режиме // Журн. техн. физики. 1994. Т. 64, № 5. С. 43–48.

Поступила в редакцию 14/IX 2001 г.