

12
Коммутация тока детонационной волной в металлической губке

© С.Д. Гилев

Институт гидродинамики им. М.А.Лавреньева СО РАН,
 630090 Новосибирск, Россия

(Поступило в Редакцию 8 ноября 1995 г.)

Коммутация тока является одной из наиболее острых проблем физики и техники мощных энергетических систем [1–4]. Известны коммутирующие элементы, работающие на различных физических принципах: механическое разрушение токовода, электрический взрыв проводника, магнитный ключ, сжатие плазменного канала ударными волнами, стимулирование разного рода плазменных неустойчивостей. Важное значение имеет поиск новых способов управления потоками электромагнитной энергии. В [5–7] предложено использовать для этих целей индуцированные ударной волной фазовые переходы конденсированных веществ, сопровождающиеся появлением или исчезновением металлической проводимости.

При изучении электрических свойств высокопористой никелевой губки в [8], зафиксирован эффект резкого возрастания электросопротивления губки при ее сжатии в ударной волне. Распространение ударной волны по исследуемому образцу сопровождается увеличением его сопротивления в 20–40 раз. Вместе с тем при выходе волны из губки на жесткую стенку сопротивление образца падает, что связано с установлением электрического контакта между отдельными проводящими областями объема губки, тормозящихся на стенке.

Целью настоящей работы является исследование возможности применения эффекта перестройки сопротивления металлической губки для коммутации тока.

Для получения устойчивого и необратимого во времени изменения сопротивления губка в настоящей работе заполнялась конденсированным взрывчатым веществом (ВВ). Для экспериментов использовалась никелевая губка с открытой структурой ячейки [8], что позволяло ВВ проникать в объем образца, заполняя все свободное пространство. Параметры губки составляли: размер ячейки около 2 мм, плотность 280 Кг/м³, средняя электропроводность $5-8 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Характерные размеры образцов $50 \times 20 \times (3-10)$ мм. Выполнено две серии экспериментов. В первой из них исследовалось электросопротивление губки при сжатии в ударной и детонационной волнах. Методика измерений описана в [8]. Во второй серии поставлены модельные эксперименты по коммутации тока.

На рис. 1 показаны осциллограммы двух экспериментов из первой серии. Опыт 467 (рис. 1,а) проведен без заполнения губки ВВ, опыт 483 (рис. 1,б) — с за-

полнением. В опыте 467 образец располагался между слоями более жесткого диэлектрика. В приближении равномерного распределения массы по объему параметры ударного сжатия губки составляли: давление 4.7 ГПа, массовая скорость 3.8 Км/с, скорость фронта ударной волны 5.1 Км/с. В опыте 463 губка помещалась в кювету из винипласта (60×60×10 мм), которая засыпалась порошковым гексогеном (плотность 10³ кг/м³). Возбуждение ударной волны (опыт 467) или детонации (опыт 463) осуществлялось от накладного генератора плоской волны. Фиксация напряжения велась с токоподводов. Сила тока была постоянна и составляла около 10 А. На рис. 1 А — момент входа волны в образец, В — расчетный момент выхода волны из образца.

Характер зависимости сопротивления на фазе однократного сжатия в опытах 467 и 463 одинаков — резкий рост сопротивления на конечной стадии сжатия образца. Как и в [8], максимум сопротивления достигается несколько позже момента прохождения волной толщины образца. После выхода волны из губки полученные зависимости обнаруживают качественное различие: в опыте 467 сопротивление образца уменьшается, в опыте 463 немного растет, быстро достигая практически постоянного уровня. Таким образом, устранение из пор воздуха и заполнение их ВВ приводят к принципиальному изменению в поведении сопротивления образца. Сжатие губки в детонационной волне сопровождается возникновением нового стационарного состояния.

В таблице приведены результаты нескольких экспериментов с никелевой губкой, заполненной гексогеном. Здесь представлена информация о номере опыта, толщине образца h , начальном сопротивлении R_0 , максимальной перестройке напряжения V_m/V_0 ,

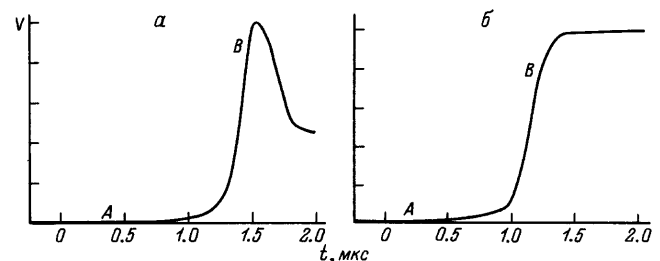


Рис. 1. Электросопротивление никелевой губки при сжатии. а — в ударной волне (опыт 467, $R_m/R_0 = 160$), б — в детонационной волне (опыт 463, $R_m/R_0 = 140$).

Номер образца	h , мм	R_0 , мОм	$\frac{V_m}{V_0}$	R_m , Ом
461	5.5	7	100	0.7
463	7.5	4.5	140	0.6
464	3.5	9.9	74	0.7

сопротивлению образца в сжатом состоянии R_m . Данные таблицы показывают, что в детонационной волне сопротивление образца увеличивается в $\approx 10^2$ раз. Время роста сопротивления, определенное от значения $0.1V_m$ до $0.9V_m$, составляет около 0.3 мкс. Образцы имели различную толщину и соответствующее начальное сопротивление. Зафиксированные перестройки сопротивления образцов различаются, однако, как видно из таблицы, конечные сопротивления близки для всех трех опытов. Это означает, что сопротивление образца в сжатом состоянии определяется не каркасом губки, а продуктами детонации ВВ. Распространение детонационной волны по образцу приводит к множественным механическим разрывам тонких металлических перемычек, составляющих элементарную ячейку губки. По мере распространения волны ток перебрасывается в невозмущенную область губки. Наиболее резкое изменение сопротивления образца происходит при разрушении последнего слоя проводящих перемычек. На экспериментальной осциллограмме (рис. 1б) это соответствует участку от точки перегиба B до установления стационарного значения напряжения (характерное время процесса ≈ 150 нс).

Участок плато на осциллограмме длится около 1 мкс, после чего напряжение на ячейке начинает вновь увеличиваться. Вторичный рост напряжения более плавный, он связан с расширением продуктов детонации и деформацией токоподводов в волне разрежения.

Эффект резкого роста сопротивления металлической губки в детонационной волне может быть использован для коммутации тока. Это продемонстрировала серия экспериментов по размыканию тока в цепи индуктивного накопителя. Емкостная батарея

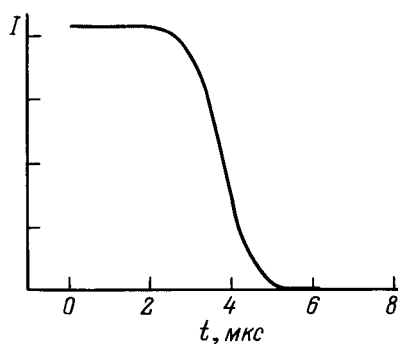


Рис. 2. Размыкание тока в цепи индуктивного накопителя.

$C = 10^{-2}$ Ф разряжалась на цепь, содержащую индуктивную нагрузку и коммутирующий элемент (губка с ВВ). В момент максимума тока в ячейку входила плоская детонационная волна, которая вызывала изменение сопротивления образца и размыкание тока. Лучшие результаты получены при заливке ячейки тротилом и сплавом его с гексогеном. Использование литых ВВ улучшает механические характеристики образца и повышает пробивную электрическую прочность.

На рис. 2 представлена осциллограмма опыта по коммутации тока. Здесь показан сигнал от индуктивного датчика после интегрирования RC -цепочкой, по величине он пропорционален току в цепи. Максимальный ток составлял $I_m = 11$ КА. Время изменения тока от $0.9I_m$ до $0.1I_m$ равно $\tau \approx 1.5$ мкс. Оценка сопротивления образца в сжатом состоянии дает $R \approx L/\tau \approx 6 \cdot 10^{-7}$ Гн/ $1.5 \cdot 10^{-6}$ с ≈ 0.4 Ом (L — индуктивность цепи). Сопротивления коммутирующей ячейки в опытах двух серий практически совпадают. Таким образом, увеличение тока в 10^3 раз не сказалось на величине сопротивления губки в детонационной волне.

Проведенные эксперименты показали возможность коммутации тока детонационной волной в металлической губке. Такой способ коммутации сочетает в себе большую скорость переключения, определяемую фазовой скоростью волны [7], и высокую электрическую прочность коммутатора в разомкнутом состоянии, характерную для продуктов детонации конденсированных ВВ [9]. Сложная структура губки является причиной сильной неоднородности гидродинамического течения продуктов детонации. Механические разрывы перемычек элементарной ячейки, осуществляемые детонационной волной, сами являются источником интенсивных гидродинамических возмущений, которые воздействуют на последующие слои губки, усиливая разрушающий эффект. Неоднородная картина течения с локальными неоднородностями и кумулятивными микроструями облегчает процесс размыкания.

Существенное изменение сопротивления коммутатора происходит при разрыве последнего слоя проводящих перемычек. Время выключения определяется при этом не полной толщиной образца, а характерным размером структуры элементарной ячейки губки. Особо отметим, что при больших электрических токах процесс коммутации может обостряться. Действительно, последовательная концентрация тока в несжатой области образца может привести к электрическому взрыву проводящих перемычек, что совместно с действием детонационной волны уменьшит время выключения тока. Основной проблемой при создании мощного коммутатора на детонационной волне в металлической губке является разработка специальных образцов с необходимыми структурными и электрическими свойствами.

Автор выражает благодарность за полезные обсуждения А.М.Трубачеву.

Список литературы

- [1] Megagauss Physics and Technology. Proc. 2nd Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation and Relative Topics. New York; London, 1980.
- [2] Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. Тр. II Междунар. конф. по генерации мегагауссных магн. полей и родств. экспериментам. М.: Наука, 1984.
- [3] Megagauss Technology and Pulse Power Applications: Proc. 4th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation and Relative Topics. New York; London, 1987.
- [4] Megagauss Fields and Pulsed Power Systems. Proc. 5th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation and Relative Topics. New York: Nova Science Publishers, 1990.
- [5] А.с. № 1052104 СССР. МКИ Н 01 Н 39/00. Взрывной переключатель. Гилев С.Д., Трубачев А.М. // Открытия. Изобретения. 1989. № 31 (приоритет от 16.07.81, зарегистрировано в Госреестре 1.07.83).
- [6] А.С. № 1039404 СССР. МКИ Н 01 Н 39/00. Взрывной переключатель. Гилев С.Д., Трубачев А.М. // Открытия. Изобретения. 1989. № 31 (приоритет от 16.07.81, зарегистрировано в Госреестре 3.05.83).
- [7] Биченков Е.И., Гилев С.Д., Трубачев А.М. // ПМТФ. 1989. № 2. С. 132–145.
- [8] Гилев С.Д. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 6. С. 84–93.
- [9] Ershov A.P., Lukjantshikov L.A., Zubkov P.I. et al. // Proc. 2nd Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation and Relative Topics. New York; London, 1980. P. 89–90.