

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И МЕХАНИЗМА ЭЛЕКТРОВЗРЫВА ГРАФИТОВЫХ ПРОВОДНИКОВ В ЖИДКОСТИ. ЧАСТЬ 1

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

1. Введение

Благодаря уникальным физическим, механическим, химическим и другим свойствам графита [1] трудно найти такую отрасль промышленности, в которой не было бы потребности в графитовых либо углеродсодержащих материалах.

Электровзрыв (ЭВ) углеродсодержащих стержней (графитовых проводников) привлекает особое внимание в связи с открытием возможности использования их для получения сфероидальных кластеров углерода – фуллеренов [2] и поиском более дешевых современных технологий получения алмазов [3, 4]. Кроме того, ЭВ графитовых проводников представляет научный интерес как процесс неметаллических материалов с проводимостью гораздо большей, чем у диэлектриков, но меньшей, чем у металлов. Литературные сведения по этим вопросам крайне скудны.

В работе [5] приведены качественные зависимости вида рассмотренных взрывных режимов графитовых проводников от соотношений между запасенной энергией W_0 и энергией сублимации проводника W_s . Кроме того, в [5] утверждается об универсальности, в том числе применимости к ЭВ графитовых проводников, безразмерных комплексов – критериев подобия $П_1, П_2, П_3$ [6], характеризующих соответственно три его стадии: нарастание тока, фазу взрыва, разряд через продукты взрыва проводника. Эти критерии успешно используются при расчете характеристик ЭВ металлических проводников для беспаузных режимов.

Результаты наших исследований значительно дополнили и выявили существенные отличия от приведенных в [5], особенно по механизму ЭВ графитовых проводников при удельной электропроводности $\sigma_0 \leq 10^4$ См/м.

Настоящие исследования посвящены выявлению особенностей, определению характеристик и механизма ЭВ графитовых проводников при изменении параметров генератора и проводника; определению возможности управления процессом.

2. Методика исследований

В качестве основного метода исследований использовалось осциллографирование силы тока $I(t)$ в разрядной цепи и напряжения на разрядном промежутке $U(t)$ с последующей обработкой полученных осциллограмм.

Применялась традиционная электрическая схема [7] с силовыми конденсаторами типа К75-29-А. Коммутатором служил воздушный шаровый разрядник, на который с блока поджига подавался импульс высокого напряжения. Блок поджига запускался прямоугольным импульсом с выхода генератора Г5-60. Одновременно с генератора импульс синхронизации подавался на вход запоминающего двухлучевого осциллографа С8-17.

В прямоугольной металлической разрядной камере емкостью 1,5 л, заполненной жидкостью (технической водой), расположены вертикально два электрода, между которыми с помощью специальных зажимов крепился исследуемый проводник. На дне камеры имелся слив, через который извлекалась жидкость с продуктами взрыва образцов.

Электровзрыв проводников осуществлялся в условиях изменения запасенной энергии конденсаторной батареи W_0 от 12 до 1000 Дж при индуктивности разрядного контура $L = 2,3$ мкГн. Зарядное напряжение U_0 изменяли от 5 до 40 кВ, а емкость C конденсаторной батареи от 1 до 3 мкФ.

В качестве исследуемых образцов использовали цилиндрические стержни из прессованного

поликристаллического графита (графитовые проводники) диаметром $d = 0,3; 0,5; 0,7$ и 2 мм. Длину стержней l изменяли от 10 до 40 мм, величины удельной электропроводности σ_0 составляли от $5 \cdot 10^3$ до $2,4 \cdot 10^5$ См/м при плотности графита ρ от $1,8 \cdot 10^3$ до $2,5 \cdot 10^3$ кг/м³.

В качестве датчиков для измерения тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ применяли соответственно коаксиальный низкоомный шунт и экранированный емкостный делитель напряжения, хорошо зарекомендовавшие себя при исследовании металлических проводников.

При расчете характеристик ЭВ с помощью осциллограмм $I(t)$ и $U(t)$ индуктивную составляющую сигнала напряжения на разрядном промежутке в основном исключали расчетным путем. Энергию, выделенную в канале разряда, определяли путем численного интегрирования полученных зависимостей $I(t)$ и $U(t)$. Точность измерений контролировали по балансу энергии в разрядной цепи.

Энергию сублимации проводников рассчитывали по формуле:

$$W_s = W_s^{yd} m = W_s^{yd} \pi \cdot \rho a^2 l, \quad (1)$$

где W_s^{yd} – удельная энергия сублимации материала проводника, m и a – исходные масса и радиус проводника соответственно.

Согласно [1], в спектре испаряющегося графита обнаружены как одно-, так и многоатомные молекулы углерода с разными энергиями сублимации. Количество испаряющихся молекул разного вида зависит от температуры испарения. При $T_0 = 2500$ К отношение $C_1:C_2:C_3:C_4:C_5 = 1:2,8:4,5:0,35:0,5$, а энергии сублимации соответственно $5,9 \cdot 10^7; 3,42 \cdot 10^7; 2,18 \cdot 10^7; 2,0 \cdot 10^7$ и $1,62 \cdot 10^7$ Дж/кг [1]. Эти данные позволяют определить энергию сублимации, необходимую для образования указанного состава молекул, $W_s^{yd} \approx 2,9 \cdot 10^7$ Дж/кг, которая и использована для расчетов.

Несмотря на широкое практическое использование графита его теплофизические свойства и поведение в диапазоне температур от 3000 К до точки плавления, изучены весьма слабо [8], что затрудняет интерпретацию экспериментальных данных.

В отличие от металлов графит имеет очень высокую температуру плавления. Плавление графита происходит при достижении температуры тройной точки на его фазовой диаграмме твердое тело – жидкость – пар. По различным данным [1, 8, 9], тройная точка находится в диапазоне от 4000 до 5000 К (а то и 6800 К [9]) и давлений P^* от 10 до 20 МПа. При меньших давлениях нагретый до этих температур графит испаряется в твердой фазе (возгонка). Следует отметить, что наличие примесей в проводнике снижает температуру его испарения [1]. В выполненных расчетах использовано значение $P^* = 20$ МПа.

Магнитное давление в проводнике $P(r)$ оценивали по известной формуле

$$P(r) = \frac{\mu_0 I^2(t)}{(2\pi a)^2} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right), \quad (2)$$

где r – расстояние от оси проводника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость материала проводника, для графита $\mu = 1$.

Максимальное магнитное давление в проводнике (на его оси) P_m рассчитывалось из (2) при $r = 0$ и токе $I(t)$, равном амплитуде первого импульса тока I_{m1} . Известно [10], что к моменту времени достижения I_{m1} для металлических проводников увеличение диаметра d не превышает 5%.

Результаты расчетов сопоставлялись с фазовой диаграммой графита, что наряду с осциллографированием, высокоскоростной киносъемкой и исследованиями продуктов взрыва позволило полнее выявить особенности и механизм ЭВ графитовых проводников.

3. Результаты исследований и их анализ

Рассмотрим ЭВ графитовых проводников с $\sigma_0 \cong 2 \cdot 10^5$ См/м.

Для сравнения с ЭВ металлических проводников на рис.1 приведены осциллограммы ЭВ медного и вольфрамового проводников диаметром $d = 0,2$ мм и длиной $l = 40$ мм. Графитовые стержни той же длины имели диаметр $0,3$ и $0,5$ мм и электропроводность σ_0 соответственно $1,97 \cdot 10^5$ и $2,05 \cdot 10^5$ См/м.

На всех приведенных в работе осциллограммах верхняя кривая – напряжение, нижняя – ток, m_u , m_i и m_t – масштабы напряжения тока и времени соответственно.

Результаты расчета характеристик ЭВ проводников приведены в табл. 1. Как видно, электропроводность σ_0 у графита приблизительно на два порядка ниже, чем у металлов, при этом плотность ρ меньше в $4,4$ раза, чем у меди, и в $9,5$ раза, чем у вольфрама. Энергия сублимации W_s значительно меньше у металлических проводников (табл.1).

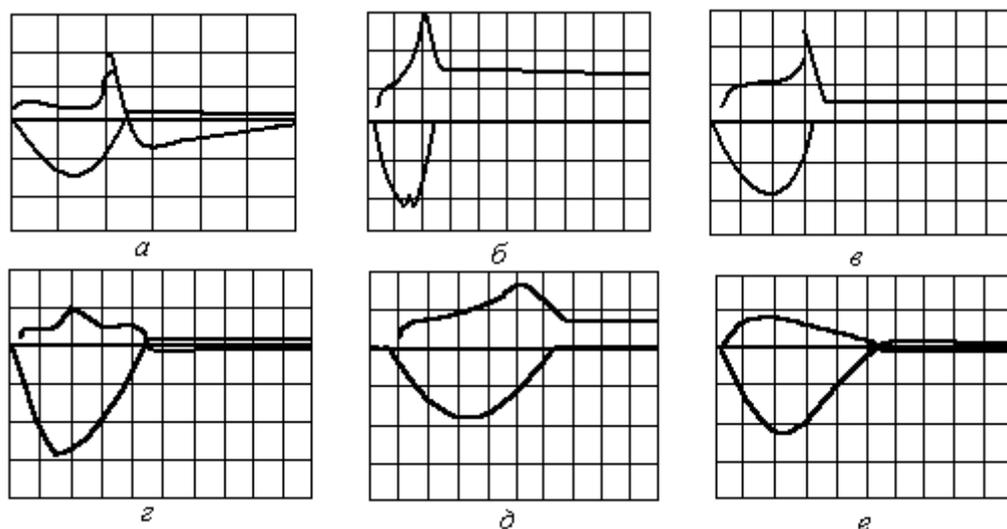


Рис.1. Осциллограммы взрыва медного (а), вольфрамового (г) и графитовых (б, в, д, е) проводников: $U_0 = 20$ (а, б, в) и 15 кВ (г, д, е); $C = 1$ мкФ; $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$ См/м (б, в, д, е); $m_U = 10$ кВ/дел; $m_t = 1$ мкс/дел (а, б, в, г, е); $m_t = 0,5$ мкс/дел (д); $m_I = 8,6$ кА/дел (а); $m_I = 2,6$ кА/дел (б, в, г, д, е)

Таблица 1. Характеристики электровзрыва металлических и графитовых проводников при $l = 40$ мм

d , мм	σ_0 , См/м	$\frac{U_0}{U_m}$	$\frac{W_0}{W_1}$	W_s , Дж	I_{m1} , кА	N_m , МВт	P_m , МПа	Π_1	Π_2	Примечание
0,2	$5,7 \cdot 10^7$	$\frac{20}{30}$	$\frac{200}{173}$	60,4	$\frac{12,2}{12,8^*}$	213	474	0,11	0,06	медь рис.1, а
0,2	$1,8 \cdot 10^7$	$\frac{15}{10,3}$	$\frac{112,5}{104}$	97,2	$\frac{7,4}{10,6^*}$	74	174	0,15	0,04	вольфрам рис.1, г
0,3	$1,97 \cdot 10^5$	$\frac{35}{53,5}$	$\frac{572,1}{245,4}$	178	$\frac{8,5}{6,9^*}$	301	102	1,98	6,81	графит рис.2, в
0,3	$1,97 \cdot 10^5$	$\frac{20}{28}$	$\frac{200}{151}$	178	$\frac{5,8}{5,0^*}$	179	97,5	1,98	2,61	графит рис.1, б
0,3	$1,97 \cdot 10^5$	$\frac{15}{15}$	$\frac{112,5}{86}$	178	$\frac{4,7}{4,3^*}$	53	31,5	1,98	1,48	графит рис.1, д
0,3	$1,97 \cdot 10^5$	$\frac{10}{6}$	$\frac{50}{44,4}$	178	$\frac{3,1}{3,5^*}$	18	14,0	1,98	0,65	графит
0,5	$2,05 \cdot 10^5$	$\frac{20}{20}$	$\frac{200}{183}$	400	$\frac{7,8}{7,9^*}$	81	31,4	0,76	0,41	графит рис.1, в
0,5	$2,05 \cdot 10^5$	$\frac{15}{8}$	$\frac{112,5}{110}$	400	$\frac{5,9}{6,9^*}$	45	18,1	0,76	0,23	графит рис.1, е
0,5	$2,4 \cdot 10^5$	$\frac{30,5}{30}$	$\frac{434,4}{403,4}$	479	$\frac{11,8}{10,9^*}$	284	71,0	0,64	0,61	графит рис.2, а
0,5	$1,8 \cdot 10^5$	$\frac{31}{39,7}$	$\frac{448,7}{357}$	441	$\frac{11,6}{10,0^*}$	256	69,7	0,81	0,90	графит рис.2, б

Примечание: звездочкой отмечены расчетные значения I_{m1} .

Однако полученные осциллограммы ЭВ этих проводников имеют много общего. Это, прежде всего, наличие пика напряжения U_m , что может свидетельствовать о распространении волны испаре-

ния. Отклонение времени достижения пика напряжения t_n от четверти периода колебаний тока $T/4$ при режиме короткого замыкания (КЗ), а также наличие остаточного напряжения на батарее конденсаторов $U_{ост}$ после первого импульса тока вызвано отклонением размеров проводника от оптимальных, когда энергия первого импульса тока $W_1 = 0,83W_0$ [6].

Как и для металлических [11], для графитовых проводников характерны токовые паузы с наличием или отсутствием (рис. 2) вторичного пробоя (дуговой стадии ЭВ). Режим ЭВ, представленный на рис. 2, *з*, соответствует режиму осциллограммы, показанной на рис. 1, *б* и полученной при меньшей длительности развертки осциллографа. Отсутствие вторичного пробоя привело к постепенному стеканию заряда конденсаторов через сопротивление разрядного промежутка.

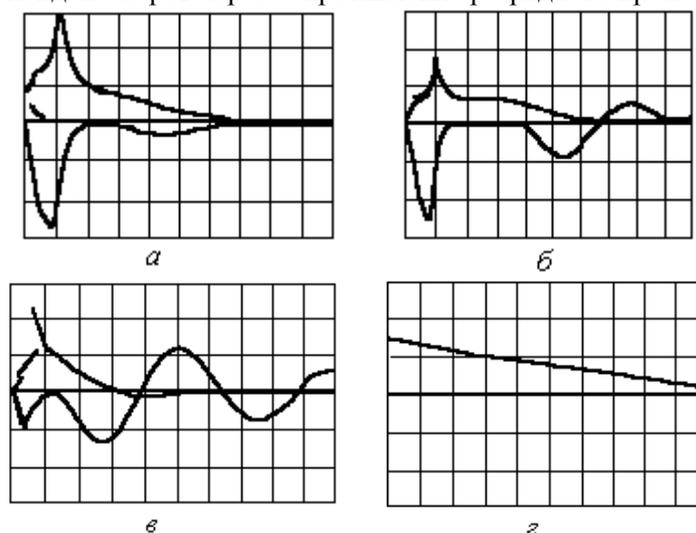


Рис.2. Осциллограммы взрыва графитовых проводников с наличием токовой паузы (*а, б, в*) и отсутствием вторичного пробоя (*з*) при $l = 40$ мм: *а*) $U_0 = 30,5$ кВ, $d = 0,5$ мм, $\sigma_0 = 2,4 \cdot 10^5$ См/м, $m_t = 2$ мкс/дел, $m_U = 10$ кВ/дел, $m_I = 4,6$ кА/дел; *б*) $U_0 = 31$ кВ, $d = 0,5$ мм, $\sigma_0 = 1,8 \cdot 10^5$ См/м, $m_t = 2$ мкс/дел, $m_U = 25$ кВ/дел, $m_I = 4,6$ кА/дел; *в*) $U_0 = 35$ кВ, $d = 0,3$ мм, $\sigma_0 = 1,97 \cdot 10^5$ См/м, $m_t = 2$ мкс/дел, $m_U = 25$ кВ/дел, $m_I = 8,9$ кА/дел; *з*) $U_0 = 20$ кВ, $d = 0,3$ мм, $\sigma_0 = 1,97 \cdot 10^5$ См/м, $m_t = 20$ мкс/дел, $m_U = 10$ кВ/дел, $m_I = 2,6$ А/дел

Сравнение осциллограмм $I(t)$ ЭВ графитовых проводников с осциллограммой тока в режиме КЗ показало, что отклонение их друг от друга в момент времени t_T соответствует уменьшению разрядного тока и изгибу на осциллограмме $U(t)$. Известно, что при взрыве металлических проводников время t_T соответствует переходу материала проводника в жидкую фазу, затем вблизи времени t_n – в газожидкостную среду, а при $t = t_n$ – в плазму [10, 11]. Для графитовых же проводников при $t = t_T$ происходит испарение твердой фазы графита. Режимам, при которых появляется пик на осциллограммах $U(t)$, соответствует (согласно высокоскоростным фотограммам процесса) образование светящегося канала разряда, который существует до момента появления токовой паузы либо при ее отсутствии и переходит в канал дугового разряда.

Расчет характеристик ЭВ показал (см. табл. 1), что для металлов и графита амплитуды тока первого импульса и мощности сравнимы по величине. Максимальное магнитное давление в металлических проводниках, имеющих меньший диаметр, больше – 474 и 174 МПа. Для графитовых проводников P_m изменялось от 14 до 102 МПа.

Пик на осциллограмме напряжения U_n наблюдался лишь при $P_m > P^*$, соответствующего появлению жидкой фазы графита. Причем U_n может превышать либо быть меньше зарядного напряжения U_0 , но во всех случаях запасенная энергия W_0 больше либо близка к энергии сублимации проводника W_s .

Из сопоставления приведенных зависимостей мощности $N(t)$, выделенной в проводнике и активного сопротивления $R(t)$, показанных на рис. 3 с осциллограммами (см. рис. 1), следует, что, как и для металлических, для графитовых проводников максимум кривой мощности N_m совпадает по времени с пиком напряжения на осциллограмме $U(t)$ и моментом появления перегиба на возрастающей части кривой сопротивления $R(t)$. Этот перегиб у графитовых проводников выражен значительно слабее, чем у металлических.

Зависимость $N(t)$ для взрыва графитового проводника $d_n = 0,3$ мм при $U_0 = 20$ кВ (см. рис. 3, кривая 2) по форме близка к полученным для металлических проводников (кривые 1, 4), но, как и

другие (3, 5, 6), сдвинута по времени к началу процесса. Это может быть вызвано тем, что в отличие от металлических, у графитовых проводников после нагрева процесс начинается не с объемного плавления проводника, а с испарения поверхностных слоев твердой фазы материала проводника (в первую очередь примесей).

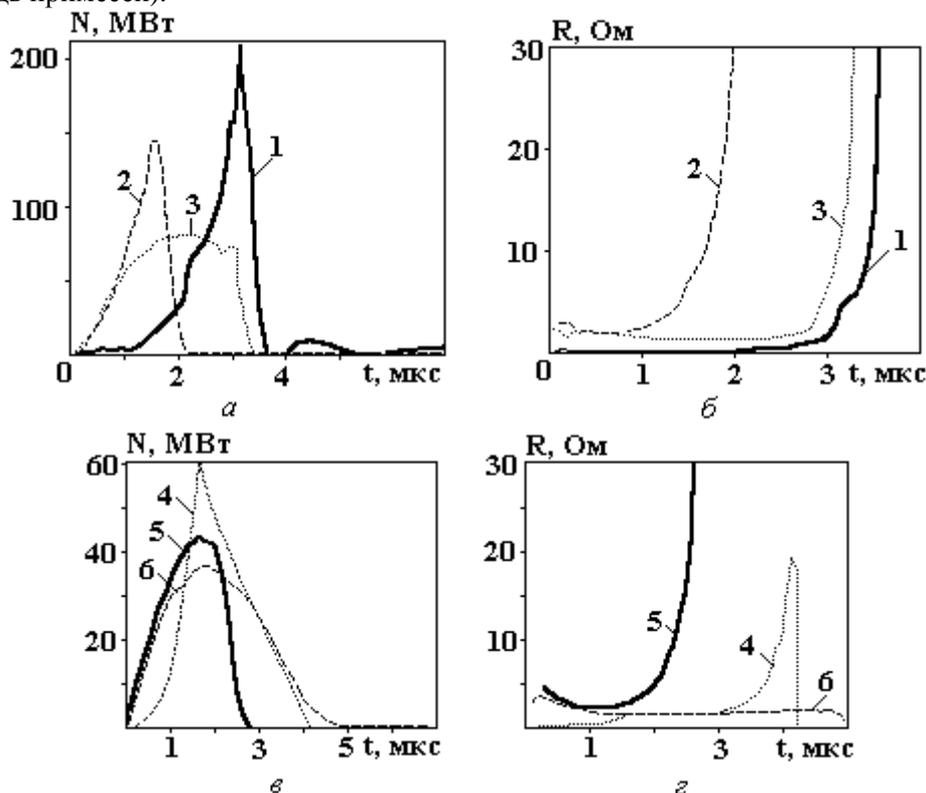


Рис.3. Мощность (а, в) и сопротивление (б, г) взрыва медного, вольфрамового и графитовых проводников при $l = 40$ мм: $U_0 = 20$ кВ: 1– медь, $d = 0,2$ мм; 2– графит $d = 0,3$ мм; 3– графит, $d = 0,5$ мм; $U_0 = 15$ кВ: 4– вольфрам, $d = 0,2$ мм; 5 – графит, $d = 0,3$ мм; 6 – графит, $d = 0,5$ мм

Кроме кривой 2, зависимости $N(t)$ графитовых проводников имеют (см. рис. 3) не вогнутую, как для металлических, а выпуклую нарастающую часть. Пик на кривых мощности 3 и 5 достигается по времени позже, чем максимальное значение мощности.

Наибольшее отличие от ЭВ металлических проводников наблюдалось при ЭВ графитового проводника $d = 0,5$ мм при $U_0 = 15$ кВ (см. табл. 1; рис. 1, е; рис. 3, кривая б), когда отсутствовали пики напряжения $U(t)$ и мощности $N(t)$. При давлении $P_m < P^*$ длительность процесса выделения энергии соответствовала полупериоду колебаний $\tau_1 \cong \pi\sqrt{LC}$. При этом энергия, выделенная за время первого импульса тока $W_1 \cong W_0$, но $W_0 < W_s$ в 3,6 раза. Не наблюдался также и характерный (как после $t = t_n$) резкий спад кривой мощности. Следовательно, механизм разрушения проводника за время процесса ЭВ не изменялся.

Если считать, что вся энергия W_1 израсходована на испарение графита, то удельная энергия $h^* = W_1/m$ составила бы $0,8 \cdot 10^7$ Дж/кг, что гораздо меньше, чем W_s^{yA} . Это свидетельствует о неполном испарении графита.

Очевидно, разрушение проводника происходило за счет неравномерного по объему нагрева его током и объемного парообразования в местах нахождения микронеоднородностей (газовых включений, примесей и пр.).

При $U_0 = 10$ кВ на осциллограммах взрыва проводников $d_n = 0,3$ мм и $d_n = 0,5$ мм пик напряжения также отсутствовал. Уменьшились величины N_m , I_m , P_m . При этом энергии W_0 и W_1 близки между собой, но значительно меньше W_s (см. рис. 4, е; табл. 1, 2).

Для графитовых проводников при снижении напряжения U_0 до 5 кВ (даже при уменьшении σ_0 до $6 \cdot 10^3$ См/м и увеличении диаметра d до 2 мм) осциллограммы, соответствующие режиму КЗ, как для металлических проводников, не наблюдались. При этом осциллограммы $I(t)$ и $U(t)$ имели вид, близкий к приведенным на рис. 1, е, а проводник, в отличие от металлических, разрушался. Следова-

тельно, режим ЭВ, соответствующий рис. 1, *e*, является характерным для графитовых проводников, когда $W_0 \cong W_1$, а $W_0 < W_s$ (при $W_s^{yd} \approx 2,9 \cdot 10^7$ Дж/кг) и $P_m < P^*$.

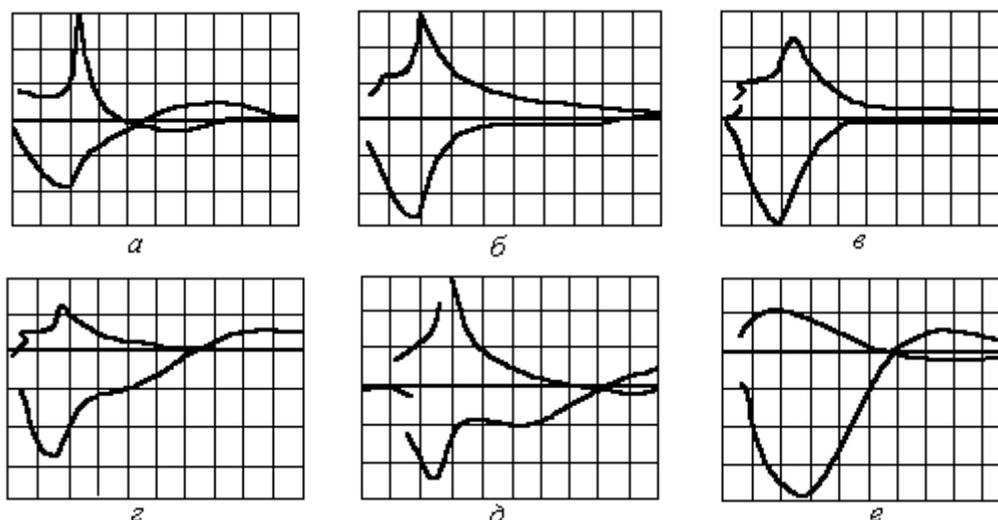


Рис.4. Осциллограммы ЭВ медного (а) и графитовых (б, в, г, д, е) проводников при $W_1 = (0,82 - 0,99)W_0$: $m_t = 1$ мкс/дел: а) $d = 0,2$ мм, $l = 40$ мм, $U_0 = 30$ кВ, $m_u = 10$ кВ/дел, $m_I = 8,9$ кА/дел; б) $d = 0,5$ мм, $l = 30$ мм, $U_0 = 28,5$ кВ, $m_u = 10$ кВ/дел, $m_I = 4,6$ кА/дел; в) $d = 0,5$ мм, $l = 30$ мм, $U_0 = 28,2$ кВ, $m_u = 10$ кВ/дел, $m_I = 4,6$ кА/дел; г) $d = 0,5$ мм, $l = 30$ мм, $U_0 = 30$ кВ, $m_u = 25$ кВ/дел, $m_I = 4,6$ кА/дел; д) $d = 0,3$ мм, $l = 10$ мм, $U_0 = 15,1$ кВ, $m_u = 5$ кВ/дел, $m_I = 2,7$ кА/дел; е) $d = 0,5$ мм, $l = 40$ мм, $U_0 = 10$ кВ, $m_u = 5$ кВ/дел, $m_I = 1,1$ кА/дел

Представляют интерес режимы электровзрыва графитовых проводников, при которых $W_0 \cong W_1$, а осциллограмма $U(t)$ имеет пик напряжения, расположенный по времени ближе к $t = T/4$ (рис. 4, б, в, г, д). Такие осциллограммы подобны полученным при оптимальном ЭВ металлических проводников. Для сравнения на рис. 4, а приведена осциллограмма ЭВ медного проводника $d = 0,2$ мм, $l = 40$ мм, близкая к оптимальной. Характеристики ЭВ медных и графитовых проводников, соответствующих осциллограммам (рис. 4), содержатся в табл. 2. В отличие от описанного выше режима, когда $W_0 \cong W_1$, но $W_0 < W_s$ при $P_m < P^*$ (см. рис. 1, е; 4, е), здесь W_0 близко к W_s а давление $P_m > P^*$, в 2,6 – 4,3 раза. Величина h^* для этих режимов близка к W_s^{yd} , кроме режима с $d_n = 0,3$ мм, $l = 10$ мм, когда $h^* = 5,73 \cdot 10^7$ Дж/кг. Это вызвано отмеченной выше зависимостью W_s^{yd} от температуры испарения графита, а следовательно, и вида испаряющихся молекул углерода.

Таблица 2. Характеристики ЭВ медного ($d = 0,2$ мм) и графитовых ($d = 0,3$ и $0,5$ мм) проводников при $W_1 = (0,81 - 0,98)W_0$

d , мм	l , мм	$\frac{U_0}{U_m}$, кВ	$\frac{W_0}{W_1}$, Дж	W_s , Дж	I_{m1} , кА	N_m , МВт	P_m , МПа	Π_1	Π_2
0,2 (медь)	40	$\frac{30}{30}$	$\frac{420}{340}$	60,4	$\frac{16,9}{14,6^*}$	433	10^3	0,12	0,115
0,5	30	$\frac{28,5}{31}$	$\frac{379}{377}$	359	$\frac{12,4}{10,6^*}$	370	78,0	0,51	0,53
0,5	30	$\frac{28,2}{21,5}$	$\frac{371}{369}$	359	$\frac{12,9}{10,5^*}$	228	85,7	0,51	0,52
0,5	30	$\frac{30}{30}$	$\frac{420}{387}$	359	$\frac{12,5}{10,8^*}$	349	79,6	0,51	0,59
0,3	10	$\frac{15,1}{15,2}$	$\frac{106}{88}$	44,5	$\frac{6,1}{4,5^*}$	77,8	52,5	0,54	1,27
0,5	40	$\frac{10}{5}$	$\frac{46,7}{40}$	400	$\frac{4,0}{5,6^*}$	19,5	8,35	0,76	0,10

Примечание: звездочкой отмечены расчетные значения I_{m1}

Очевидно, что сначала происходит испарение внешних слоев проводника. Затем наблюдается более энергоемкий процесс – испарение центральных слоев проводника, находящихся в жидком состоянии. Уменьшение проводящей площади сечения проводника вследствие испарения способствует повышению давления и температуры. Таким образом, для всех режимов, при которых $P_m > P^*$, характерно наличие пика на осциллограмме $U(t)$.

Увеличение диаметра d проводника ведет к росту времени t_n , уменьшению максимального напряжения U_m , отношения энергий W_0/W_s и начального напряжения токовой паузы. Уменьшение длины проводника приводит к снижению энергии W_s и изменению характеристик и механизма ЭВ в соответствии с приведенными выше качественными соотношениями между W_0 , W_1 , W_s , U_n/U_0 , P_m/P^* .

Замечено, что беспазуный ЭВ графитовых проводников достаточно стабильный, поскольку процессы происходят внутри проводника. Стабильность ЭВ с токовой паузой, особенно длительной, значительно снижается после загрязнения рабочей жидкости продуктами ЭВ, что характерно и для взрыва металлических проводников.

Уменьшение σ_0 до $2,6 \cdot 10^4$ См/м при $d = 0,7$ мм и до 10^4 См/м при $d = 0,5$ мм привело к изменению характера осциллограмм вследствие большего начального сопротивления R_0 проводника. Такой ЭВ, а также процессы в более толстых проводниках рассмотрены во второй части настоящей работы.

4. Критерии подобия

Представляет интерес проверить применимость к ЭВ графитовых проводников критериев подобия Π_1 , Π_2 [6, 12]

$$\Pi_1 = (R_{\text{ц}} + R_0) \sqrt{C/L}; \quad \Pi_2 = \frac{CU_0^2 \sqrt{C/L}}{d^4 \rho_0 \sigma_0 (\lambda + \gamma)}; \quad (3)$$

где $R_{\text{ц}}$ – сопротивление элементов разрядной цепи, $R_{\text{ц}} \cong 0,1 \sqrt{L/C}$; λ и γ – удельная теплота плавления и парообразования соответственно.

С целью сравнения с экспериментальными данными использовалась зависимость, приведенная для расчета I_{m1} металлических проводников [6, 12],

$$I_{m1} \approx 0,5 \Pi_2^{-1/4} U_0 \sqrt{C/L}. \quad (4)$$

Возможность расчета величины I_{m1} важна для определения давления P_m по формуле (2) при оценке механизма процесса ЭВ для графитовых проводников.

Для металлических проводников при расчете тока I_{m1} по формуле (4) пренебрегали критерием Π_1 ввиду малого сопротивления R_0 .

В табл. 1, 2 приведены значения критериев Π_1 , Π_2 и тока I_{m1} , рассчитанных по формулам (3) и (4) при условии, что $\lambda + \gamma = W_s^{yd} = 2,9 \cdot 10^7$ Дж/кг. Значения критериев Π_1 и Π_2 для графитовых проводников значительно больше, чем для металлических, и изменялись в диапазоне 0,51 – 1,98 и 0,1 – 6,81 соответственно. Меньшие Π_1 и Π_2 наблюдались в режимах, когда $W_0 \cong W_1$ (см. табл.2), большие – при $d = 0,3$ мм, $U_0 \geq 20$ кВ (см. табл. 1). При этом расчетные значения I_{m1} практически совпадали либо отличались от экспериментальных в основном менее чем на 20%. Наибольшее отличие наблюдалось при крайних значениях критерия Π_2 .

В работе [13] для расчета I_{m1} ЭВ металлических проводников в формуле, на основе которой получена (4), имеется множитель $\Pi_1^{1/3}$. Согласно расчетам, для рассмотренных ЭВ графитовых проводников введение в формулу (4) этого множителя целесообразно, когда $\Pi_1 > 1$ и $\Pi_2 > 2$. Это существенно увеличивает I_{m1} и приближает для $d = 0,3$ мм, $U_0 > 20$ кВ расчетные значения I_{m1} к экспериментальным.

Аналогичное увеличение расчетных значений I_{m1} получается при использовании в формуле (3), (4) вместо $W_s^{yd} \approx 2,9 \cdot 10^7$ Дж/кг величины $W_s^{yd} \approx 5,9 \cdot 10^7$ Дж/кг. Это соответствует преимущественному содержанию в углеродном паре одноатомных молекул C_1 , что вполне возможно при $d = 0,3$ мм и высоких U_0 либо малой длине ($l = 10$ мм).

Для режимов, $W_0 < W_s$ и $P < P^*$ (рис. 1, e; 4, e), приближение к экспериментальным обеспечивает использование $W_s^{yd} \leq 2,1 \cdot 10^7$ Дж/кг, что соответствует преимущественному содержанию в паре многоатомных молекул углерода.

5. Заключение

Исследования электровзрыва (ЭВ) графитовых проводников $d \leq 0,7$ мм при $\sigma_0 \geq 10^5$ См/м показали, что между ЭВ графитовых и металлических проводников много общего, но есть существенные различия в характеристиках, а также механизме процесса ЭВ. Показана возможность управления ЭВ графитовых проводников при использовании полученных качественных соотношений для выбора необходимого режима и механизма процесса, а также расчета амплитуды первого импульса тока и максимального магнитного давления при отсутствии осциллограмм ЭВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мармер Э.Н. Углеграфитовые материалы. М., 1973.
2. Богуславский Л.З., Гук И.П., Кускова Н.И., Хайнацкий С.А. Электровзрывной метод получения фуллеренов // Электронная обработка материалов. 2002. № 4. С. 30 – 34.
3. Верещагин Л.Ф. Синтетические алмазы и гидроэкструзия. М., 1982.
4. Бушман А. В., Воробьев В. С., Рахель А. Д., Фортон В.Е. О возможности электровзрывного синтеза искусственных алмазов // ДАН СССР. 1990. Т. 315. №5. С. 1124 – 1126.
5. Богуславский Л.З., Кускова Н.И., Петриченко В.Н., Хайнацкий С. А. Электрический разряд в графите и его особенности // Электронная обработка материалов. 2002. № 3. С. 32 – 38.
6. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев, 1986.
7. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. М.; Л., 1955.
8. Шейндлин М.А., Сенченко В.Н. Экспериментальное исследование термодинамических свойств графита в окрестности точки плавления // ДАН СССР. 1988. Т. 293. № 6. С. 1383 – 1386.
9. Bundy F.P., Bassett W.A., Weathers M.S. The Pressure-Temperature Phase and Transformation Diagram for Carbon // Carbon. 1996. V. 34. № 2. P. 141 – 153.
10. Коваль С.В., Кривицкий Е.В., Раковский Г.В. Исследование высокотемпературных свойств металлов методом подводного электрического взрыва проводников // Препринт № 7. ПКБЭ АН УССР. Николаев, 1989.
11. Взрывающиеся проволоки / Под ред. А. А. Рухадзе. М., 1963.
12. Шолом В.К. Исследование процессов преобразования электрической энергии при подводном электрическом взрыве проводников // Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев, 1975.
13. Азаркевич Е.Н. Применение теории подобия к расчету некоторых характеристик электрического взрыва проводников // Журнал техн. физики. 1973. Т. 45. Вып. 1. С. 141 – 145.

Поступила 08.10.03

Summary

Peculiarities and electrotechnical characteristics of electrical explosion of graphite conductors (EE) with diameter 0.3 – 0.7 mm and specific conductivity not less than 10^5 Sm/m are determined. Qualitative relations for choosing of a necessary mode and mechanism of EE are obtained. The possibility of calculation of amplitude of the first pulse of a current and magnetic pressure for EE graphite conductors is shown.