

Н.И. Кускова, В.Ю. Бакларь, С.А. Хайнацкий

О ПОЛУЧЕНИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ В ЖИДКОСТИ. Часть II. ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ В ЖИДКОСТИ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, defr@iipr.com.ua*

В первой части работы [1] приведены результаты исследования особенностей электрического взрыва металлических проводников в жидкости, термодинамические и электрические параметры которых различаются в широком диапазоне. Для определения влияния этих свойств на характер взрыва геометрические размеры проводников и энергетические параметры контура во всех опытах были одинаковы. Оказалось, что зависимость размера получаемых частиц от плотности энергии, введенной к моменту взрыва в единицу массы проводника, и обратная зависимость между энергией дуговой стадии взрыва и размером частиц – свидетельствуют о том, что поиск режимов взрыва проводников, приводящих к минимально возможным размерам получаемых частиц, следует проводить в области наибольших скоростей ввода энергии. Такими режимами, скорее всего, могут оказаться так называемые «согласованные» режимы взрыва проводников из тех же материалов. Поискам согласованных режимов взрыва для проводников из титана, никеля и никельсодержащих сплавов (нихром, сталь ЭИ-868 и ВЖ100) посвящена данная часть работы. Результаты, полученные для медных проводников, как и ранее, приводятся для сравнения. В основном методика эксперимента была та же, что и изложенная в ч. I статьи. Только на этот раз при одинаковых во всех опытах наборах электротехнических параметров велся поиск согласованного режима для каждого из проводников за счет варьирования его геометрическими параметрами: длиной, диаметром или площадью сечения. Использовалось в основном два набора электротехнических параметров: в первом начальное напряжение на конденсаторной батарее $U_0 = 30$ кВ, емкость конденсаторной батареи $C = 3$ мкФ и индуктивность разрядного контура $L \approx 3$ мкГн, во втором $U_0 = 9$ кВ, $C = 6$ мкФ и $L = 3,32$ мкГн. Для общности результатов выбор параметров был сделан произвольно.

Согласованный режим взрыва проводников и подобие электрических характеристик.

Под согласованным режимом подразумевается режим, при котором совокупность параметров разрядного контура и взрывающегося проводника обеспечивает выделение энергии, запасенной в конденсаторной батарее, в течение первого полупериода разряда (впервые термин был применен, по видимому, в [2]). Для импульсных устройств с сосредоточенными параметрами, каковым и является используемый в эксперименте разрядный RLC -контур, такой режим реализуется при нагружении линии на согласованную нагрузку (откуда и название режима), когда практически вся мощность поглощается чисто активным сопротивлением. Такие режимы взрыва проводников в литературе называют также «одиночными» [3] – из-за вида осциллограмм тока и напряжения и «оптимальными» [4] – с точки зрения эффективности энерговода. Наиболее удачные из всех известных соотношений для определения оптимальных длины и диаметра проводника, обеспечивающие условия для его электрического взрыва в согласованном режиме при заданных параметрах контура, получены в [4] (они приведены в первой части статьи).

Можно предположить, что электрические характеристики (ток и напряжение) взрыва проводников в согласованных режимах подобны. Для оптимальных режимов критерии подобия Π_2 и Π_3 [4], определяющие процесс разрушения проводника, происходящий в течение спада тока в первом импульсе, и фазу вторичного зажигания разряда в соответствии с соотношениями для определения оптимальных длины и диаметра проводника, должны быть константами. Если построить экспериментальные зависимости тока от времени для различных согласованных режимов взрыва, используя

масштабы для тока $m_I = U_0(C/L)^{1/2}$ и времени $m_t = (LC)^{1/2}$, то эти кривые должны совпасть, как совпадают приведенные в [4] зависимости тока разряда от времени при Π_2 и Π_3 , равных *idem*. Расчет отношения запасенной в конденсаторной батарее энергии $W_0 = CU_0^2/2$ к массе взрываемого проводника W_0/m для приведенных режимов показывает, что, несмотря на очень большие различия в параметрах контура и размерах проводников, отношение W_0/m для них совпадает с точностью, превышающей точность эксперимента. Естественно предположить, учитывая сказанное, что для оптимальных режимов $(W_0/m)_{opt}$ является не просто постоянной, а константой, характеризующей свойства вещества.

Результаты экспериментальных исследований. В табл. 1 представлены расчетные параметры, характеризующие взрыв в целом и его отдельные фазы: оптимальный диаметр проводника d_{opt} , геометрические параметры взрываемого проводника – диаметр d (для фольги указаны толщина и площадь сечения S), его длина l , критерии подобия Π_1 , Π_2 и Π_3 , значения $(W_0/m)_{opt}$ для исследуемых проводников и отношение запасенной энергии W_0 к массе взрываемого проводника m . Оптимальная длина согласно [4] не зависит от материала проводника, поэтому для всех проводников при выбранных параметрах контура она одинакова – для первой группы параметров $l_{opt} = 103,9$ мм, для второй – 38 мм. Однако, поскольку для проволочек трудно подобрать проводник необходимого сечения, в эксперименте приходилось корректировать оптимальную длину исходя из наличия проводника определенного диаметра. Корректировка производилась с помощью соотношений подобия – зная $(W_0/m)_{opt}$ для данного металла и диаметр проволочки, несложно вычислить оптимальную длину проводника. Поэтому табл. 1 включает также и этот параметр. Кроме того, таблица содержит результаты взрыва проводников при различных наборах параметров, поэтому в первом ее столбце металл взрываемого проводника указывается с индексами, отвечающими этим наборам. Так, цифра 2 соответствует второму набору параметров.

Таблица 1

Металл	$d_{opt}, \text{Мм}$	$d, \text{мм}$	$l_{opt}, \text{Мм}$	$l, \text{мм}$	$S, \text{мм}^2$	Π_1	Π_2	Π_3	$(W_0/m)_{opt}, \text{кДж/г}$	$W_0/m, \text{кДж/г}$
Cu	0,3	0,3	104	104	-	0,125	0,203	0,04	20,56	20,56
Cu2	0,21	0,2	38	38	-	0,127	0,249	0,04	20,56	22,79
Ni	0,4	0,3	104	90	-	0,187	0,624	0,03	11,98	24,25
Ni2	0,28	0,3	38	38		0,172	0,22	0,04	11,98	10,34
Ti	0,73	-	104	170	0,23	0,51	0,67	0,11	6,9	7,673
Ti2	0,51	-	38	35	0,08	0,42	1,34	0,03	6,9	19,29
HX	0,79	0,3	104	90	-	1,53	9,68	0,03	3,325	26,5
HX2	0,55	0,3	38	28	-	0,7	2,34	0,02	3,325	15,3
ЭИ	0,72	-	104	140	0,12	1,57	2,43	0,07	3,658	9,35
ЭИ2	0,5	-	38	30	0,09	0,62	0,886	0,03	3,658	9,65
ВЖ	0,63	-	104	115	0,11	0,88	1,65	0,05	4,743	18,1
ВЖ2	0,44	-	38	25	0,11	0,33	0,4	0,02	4,743	10,1

Для медной проволочки переход к оптимальным параметрам, по сравнению с результатами [1], заключался в увеличении длины проводника с 80 до 104 мм. Такое изменение размеров проводника привело к существенному изменению характера взрыва (вида осциллограмм) и его основных параметров. Увеличились пик перенапряжения и максимальный ток, соответственно увеличился пик мощности, при этом несколько уменьшилось максимальное сопротивление, а таким образом, и отношение R_{max}/R_0 (R_0 , естественно, увеличилось) – см. табл. 2. Время достижения пика перенапряжения уменьшилось, как и все остальные характерные времена.

При увеличении емкости C до 6 мкФ при $U_0 = 30$ кВ и изменении геометрических параметров взрываемого проводника d до 0,4 мм и $l = 124$ мм удельная запасенная энергия $(W_0/m) = 20,42$ кДж/г также оказалась близкой к $(W_0/m)_{opt}$ для меди. Безразмерные кривые тока разряда и пики напряжения при этом, как и следовало ожидать, совпали. Для медной фольги с параметрами $S = (0,05 \times 1,37)$ мм² и $l = 104$ мм при $C = 3$ мкФ, $W_0/m = 21,23$ – немного больше, чем $(W_0/m)_{opt}$. Соответственно вид осциллограммы «деформировался» в сторону аperiodического режима (глубокий спад тока, ярко выражена дуговая стадия), пик перенапряжения немного увеличился, максимальный ток и пик мощности уменьшились, время до взрыва сократилось, вся энергия выделилась в первом полупериоде, но с существенным увеличением времени – за 17–18 мкс. Незначительное увеличение (до 1,38 мм) ширины фольги привело к совпадению безразмерных кривых тока с двумя предыдущими.

Переход ко второй группе параметров контура при $d = 0,2$ мм и $l = 38$ мм только подтвердил предыдущие результаты, хотя, несмотря на практическое совпадение приведенных осциллограмм, значение $W_0/m = 22,79$ кДж/г несколько отличается от значения $(W_0/m)_{opt}$. Таким образом, значение отношения W_0/m для взрыва медных проводников в согласованных режимах не зависит от параметров контура и размеров проводника и составляет $(W_0/m)_{opt} = 20564,77$ Дж/г.

Опыты с никелевым проводником диаметром 0,3 мм показали, что для первой группы параметров контура достичь согласованного режима взрыва проводников невозможно. Для Ni при представленных в табл. 1 размерах проводника и выбранных параметрах контура $W_0/m = 24,25$ – значительно больше, чем $(W_0/m)_{opt}$. Следует учесть, что, как следует из таблицы, в этом случае диаметр проводника меньше оптимального почти в 1,5 раза. Для проводника же с $d = 0,3$ мм (при тех же электрофизических параметрах) расчетное по величине $(W_0/m)_{opt}$ для Ni значение $l_{opt} = 220,3$ мм – то есть в 2,5 раза больше взятого. При постепенном увеличении длины проводника от 80 до 100 мм пик перенапряжения уменьшается, при этом “полка”, соответствующая стадии плавления, поднимается, увеличивается максимальный ток, первый спад тока становится глубже. Немного увеличиваются пик мощности, максимальное сопротивление и отношение R_{max}/R_0 , увеличиваются все характерные времена. Дальнейшее увеличение длины проводника приводит к возникновению паузы тока уже при длинах чуть больше 100 мм, при этом с увеличением длины увеличивается также длительность паузы. При 130 мм она составляет около 10 мкс, при 150 мм – 20 мкс, для проводника длиной 220 мм – значительно превышает 500 мкс. На величину пика перенапряжения (около 38 кВ), на напряжение «полки» паузы, на максимальный ток и на все характерные времена взрыва увеличение длины проводника при этом влияния практически не оказывает. Немного увеличивается напряжение, при котором начинается плавление проводника, а при существенном увеличении длины проводника (более 150 мм) постепенно начинает возрастать напряжение, при котором возникает пауза тока. Таким образом, взрыв никелевого проводника диаметром 0,3 мм при $L = 3$ мкГн и $C = 3$ мкФ в согласованном режиме невозможен ни при каких длинах.

Увеличение емкости конденсаторной батареи до 6 мкФ для никелевого проводника диаметром 0,3 мм позволяет определить набор оптимальных параметров, которые при $U_0 = 9$ кВ и $l = 38$ мм подтверждаются экспериментально. Эти результаты приведены в табл. 1–4 в строках, обозначенных Ni2.

Из табл. 1 видно, что геометрические параметры проводника мало отличаются от расчетных оптимальных параметров для второго набора параметров контура. Длина проводника отличается на 0,03 мм (~ 0,1%), а диаметр – примерно на 0,02 мм. При этом удельная запасенная энергия для такого проводника отличается от $(W_0/m)_{opt}$ почти на 14%. Такое довольно сильное отличие объясняется значительным влиянием индуктивности контура на оптимальный диаметр и длину проводника.

Тенденции зависимости характера взрыва никелевого проводника диаметром 0,3 мм от длины при втором наборе параметров контура существенно отличаются от указанных для 3 мкФ и 30 кВ. В диапазоне 30–90 мм максимальные ток и напряжение, а также все характерные времена отличаются незначительно. С ростом длины максимальный ток I_m уменьшается, для $l \leq 50$ мм величина пика напряжения U_m и напряжение, при котором начинается плавление, растут, время до I_m при росте l уменьшается, а до U_m растет при длине $l \leq 50$ мм. При длине проводника 70 мм напряжение, при котором начинается плавление, по амплитуде становится больше «взрывного» пика, а при $l = 90$ мм вместо пика перенапряжения – небольшой перегиб в целом падающей после пика (отвечающего моменту начала плавления) кривой напряжения. Во всем диапазоне длин проводников – от 30 до 90 мм – не обнаружены ни «паузные», ни колебательные режимы разряда. Характер изменения вида осциллограмм при увеличении длины проводника до 70 мм свидетельствует о смене механизма разрушения проводника – от «взрывного» до «механического». Проведение серии экспериментов по взрыву никелевых проводников для второй группы параметров, а также для напряжения 8,2 кВ при $C = 18$ мкФ и той же индуктивности (диаметр проводника 0,4 мм, длина 45,5 мм) дало одинаковое значение для $(W_0/m)_{opt}$, равное 11,98 кДж/г. Таким образом, для никеля $(W_0/m)_{opt}$ также является константой материала, не зависящей от параметров контура и размеров проводника.

Вид осциллограмм тока и напряжения при взрыве **титановой фольги** толщиной 0,1 мм, шириной 2,3 мм и длиной 170 мм при первом наборе параметров контура довольно существенно отличается от характерных осциллограмм тока и напряжения для меди и никеля. На осциллограмме напряжения на переднем фронте практически нет “полки” (или они не выражены), на заднем фронте – колебания и небольшая “полка”, – возможно, это связано с разрушением проводника и формированием дугового разряда. Напряжение достигает максимального значения примерно на 2,5 мкс раньше максимума тока. При этом значение пика – меньше трети от U_0 . Энергии в проводнике к этому времени

выделяется также меньше трети от запасенной. Ток имеет вид «купола», без каких-либо изгибов, изохронных пику напряжения. Удельная запасенная энергия для этого режима $W_0/m = 7,673$ кДж/г. Судя по виду осциллограмм, вся запасенная энергия выделяется в течение первого полупериода. Для титановых проводников круглого сечения при этих параметрах оптимальный диаметр должен был быть равным 0,713 мм. При этом объем проводника $V = 41,464$ мм³. Объем фольги длиной 180 мм и сечением 2,3 мм отличается в третьем знаке. Варьирование размерами проводника при неизменных параметрах контура позволяет получить более точное $(W_0/m)_{opt} = 6,9$ кДж/г.

Для второй группы параметров контура в таблицах для сравнения приведен режим взрыва, по значению $W_0/m = 19,29$ кДж/г существенно отличающийся от оптимального. Это значение почти втрое меньше, чем для параметров [1], и почти втрое больше, чем для оптимальных параметров. Соответственно отсутствует колебательная стадия разряда, характерная для режима [1]. В то же время, несмотря на то что вся запасенная энергия выделяется в первом полупериоде, характер осциллограмм существенно отличается от согласованных. Разряд имеет скорее всего аperiодический характер с достаточно длинной (до 20 мкс) фазой спада тока и напряжения. Следует отметить также появление для этого режима характерной «полки» на осциллограмме напряжения, обычно соответствующей фазе плавления проводника. Обработка осциллограмм и проведенные расчеты показывают (см. табл. 4), что в проводнике за соответствующий момент времени энергии выделяется на порядок больше, чем необходимо для фазового перехода.

Нихромовый проводник ведет себя в процессе электровзрыва во многом так же, как и никелевый, что вовсе не удивительно, исходя из его состава (до 80% Ni). При напряжении 30 кВ и емкости 3 мкФ для проводника диаметром 0,3 мм также не удалось реализовать оптимальный режим взрыва, поэтому по аналогии с результатами взрыва никелевого проводника такого же диаметра поиск согласованного режима при взрыве нихромового проводника был продолжен при емкости конденсаторной батареи $C = 6$ мкФ. Оптимальную длину проводника искали в окрестности 20–40 мм с шагом 2 мм. Близким к согласованному (судя по осциллограммам) оказался режим взрыва проводника длиной 28 мм. Зато оптимальный диаметр, как раз зависящий от свойств материала проводника, при расчете по формулам [4] оказался почти вдвое больше выбранного: $d_{opt} = 0,55$ мм.

Анализ осциллограмм тока и напряжения показывает, что для выбранного режима не вся запасенная энергия выделяется в процессе взрыва – в конце активных процессов, когда ток в проводнике прекращается, на разрядном промежутке видно еще небольшое (порядка 200 В) остаточное напряжение, которое сохраняется длительное время. Доля энергии, выделившейся на разрядном промежутке, при этом довольно большая – до 95%. Этот факт свидетельствует о том, что режим близок к оптимальному. Однако большая разница между оптимальным и реальным диаметрами и наличие на осциллограмме напряжения «хвоста» позволяют предположить, что существуют другие варианты точной реализации оптимального режима нихромового проводника диаметром 0,3 мм при таких параметрах контура. Компьютерное моделирование и контрольный эксперимент показали, что такой режим реализуется при очень большой индуктивности контура – около 440 мкГн. При этом $l_{opt} = 129$ мм, а $(W_0/m)_{opt} = 3,325$ кДж/г. В остальном характер зависимости режима взрыва проводника от его длины для нихрома сходен с поведением никелевого проводника. Длина нихромового проводника, при которой происходит смена механизма его разрушения при взрыве, при этих параметрах несколько меньше, чем для никелевого (примерно 50 мм).

Для стали ЭИ-868 в таблицах приведены данные по двум режимам взрыва: для первой группы параметров контура при размерах фольги $S = (0,27 \times 0,43)$ мм² и $l = 140$ мм результаты находятся в строках, обозначенных «ЭИ», и для второй («ЭИ2») – при $S = (0,27 \times 0,35)$ мм² и $l = 30$ мм. В первом случае при $W_0/m = 9,35$ кДж/г на осциллограмме тока наблюдается характерная пауза длительностью около 12 мкс. Общая длительность разряда – 45 мкс. На кривой напряжения имеется «полка», соответствующая по времени и выделившейся энергии (см. табл. 3) участку плавления проводника. Сопротивление проводника к моменту пика напряжения растет незначительно, основной его рост приходится на участок перед паузой тока.

«Точный» согласованный режим был реализован при увеличении сечения проводника до $S \cong (0,27 \times 1,5)$ мм² и расчетной длине $l_{opt} = 104$ мм. Значение $(W_0/m)_{opt}$ составило 3,658 кДж/г. Характер поведения параметров взрыва при изменении размеров проводника примерно такой же, как и у проводников из других металлов. Уменьшение сечения проводника за счет длины или ширины фольги приводит к более раннему взрыву, при этом энергии к моменту взрыва выделяется меньше, уменьшаются также максимальный ток и мощность, зато максимальное напряжение и отношение R_{max}/R_0 увеличиваются. Во всех случаях к моменту максимума напряжения энергии в проводнике выделяется меньше, чем необходимо для его полного испарения (т.н. энергии сублимации), –

см. табл. 3, 4. В случаях, когда длина проводников составляла 140 мм, а ширина – от 0,33 до 0,43 мм, энергия сублимации оказывалась больше запасенной энергии, но на виде осциллограмм это не сказывалось. Вид осциллограмм практически во всех режимах, кроме первого (с $l = 80$ мм [1]), свидетельствовал о том, что разряд носит аperiodический характер – то есть на всех стадиях взрыва сопротивление нелинейной нагрузки превышает характеристическое сопротивление контура. В ряде случаев при переходе к более узким проводникам на осциллограмме возникала пауза тока. В целом при увеличении W_0/m за счет уменьшения длины проводника (при одинаковом сечении) пик мощности растет, при этом увеличение W_0/m за счет уменьшения ширины приводит к противоположному результату.

Бликий к оптимальному режим взрыва стальной фольги (ЭИ868) для второй группы параметров контура был реализован при размерах проводника $0,27 \times 0,35 \times 30$ мм³, при этом W_0/m составило 9,65 кДж/г – несколько больше, чем в приведенном выше режиме. Зависимость напряжения от времени для этого режима по форме очень похожа на осциллограмму для титановой фольги при тех же параметрах контура и равном отношении $(W_0/m)_{opt}/(W_0/m)$. Значения энергии, выделившейся к моментам начала «полки» и ее окончания, совпадают с расчетными значениями (табл. 3). К моменту максимума напряжения в проводнике выделяется почти вдвое меньше энергии, чем необходимо для его полного испарения (табл. 4), причем вся выделившаяся в проводнике в процессе взрыва энергия меньше энергии сублимации. Всего же в проводнике выделяется немногим больше 80% всей запасенной энергии.

Осциллограммы тока и напряжения при взрыве проводников из стали ВЖ100, как уже было замечено в [1], при близких электротехнических и геометрических параметрах качественно ближе всего к нихрому. Для первой группы параметров при фиксированном сечении фольги увеличение длины проводника также приводит к паузным режимам. Режим, приведенный в таблицах, – пограничный между паузными и аperiodическими. Оптимальный режим реализуется при ширине фольги около 1,15 мм и дает значение $(W_0/m)_{opt} \cong 4,74$ кДж/г. Для второй группы параметров контура такое же значение W_0/m реализуется при взрыве фольги с размерами $0,27 \times 0,56 \times 38$ мм³. Приведенный же в таблицах режим ($W_0/m = 10$ кДж/г) по виду осциллограмм очень близок к оптимальному – «основной» импульс тока и напряжения и незначительные, в ширину луча, «хвосты». Но энергия, выделившаяся на активной стадии разряда, составляет при этом не более 75% – остальная энергия теряется в «хвостах» и на элементах контура. По-видимому, такая ситуация является характерной для проводников с относительно невысокой электропроводностью.

Временные и амплитудные характеристики процесса взрыва представлены в табл. 2. Здесь $t_{вз}$ – время взрыва (соответствует пику перенапряжения).

Таблица 2

Ме-талл	$t_{вз}$, мкс	I_m , кА	U_m , кВ	N_{max} , МВт	R_{max}/R_0
1	2	3	4	5	6
Cu	5,38	27,2	56,1	1148	140
Cu2	8	10,9	16,4	135	138
Ni	5,46	19,9	36	400	46,2
Ni2	9,59	8,99	9,45	40	57,9
Ti	3,62	15,7	19	268	3,2
Ti2	6,5	5,58	8,48	43,2	7,1
HX	3,82	16,8	40	540	2,7
HX2	8,05	7,32	10	55	4,3
ЭИ	5,95	12,54	28	284	4,25
ЭИ2	8,68	7,25	6,37	33,2	3,6
ВЖ	4,41	12,54	32,1	290	4,9
ВЖ2	4,91	5,73	7,4	40,3	8,1

По-прежнему наиболее близки по представленным в табл. 1 и 2 параметрам взрыва Cu и Ni, Ti и сталь ЭИ-868. Безразмерные значения времени взрыва и максимального тока точно совпадают только для согласованных режимов взрыва медных проводников. Взрыв титановых проводников происходил без пика перенапряжения, причем для первой группы параметров $U_m \ll U_0$.

В табл. 3 приведены экспериментальные и расчетные значения энергии, выделившейся в проводниках на различных стадиях взрыва: W_1 – нагрев проводника до температуры плавления; W_2 – плавление (скрытая теплота плавления); W_3 – нагрев до кипения; W_4 – кипение; W_s – энергия, необходимая для полного испарения проводника (энергия сублимации). W_s рассчитывалась для двух возможных «сценариев» – равновесного испарения (обозначено буквой b) и спиноподобного распада (обозначено буквой s).

Таблица 3

Металл	W_1 , Дж		W_2 , Дж		W_3 , Дж		W_4 , Дж		W_s		
	Эксп.	Теор.	Эксп.	Теор.	Эксп.	Теор.	Эксп.	Теор.	Эксп.	Теор.	
										b	s
Cu	19,65	27,43	126,5	13,44	182,8	38,3	430,4	314,1	1122	393,23	540
Cu2	10,6	4,46	16,8	2,18	17,1	6,22	144,8	51	189,3	63,86	87,7
Ni	48,8	35,5	177,2	16,82	491	32,9	241,1	360,9	958,2	446,15	630
Ni2	5,25	14,99	23,11	7,13	46,2	13,9	141,4	152,4	216	188,4	266,1
Ti	13,3	153,3	6,6	56,9	102,9	148,2	292,5	1580	415,2	1937,9	2720
Ti2	25,4	10,98	71,01	4,08	33,12	10,61	37,79	113,1	129,6	138,8	194,8
HX	66,8	35	139	16,29	110,6	35,9	408	381,7	724,7	468,8	654,5
HX2	19,7	10,9	14,5	5,1	34,6	11,2	98,6	118,8	167,4	145,9	203,6
ЭИ	61,4	78,1	75,6	70	83,8	75,2	733,6	1567	954,4	1790,5	2129
ЭИ2	15,1	13,6	17,4	12,2	16,9	13,1	116	273,4	165,4	312,3	371,3
ВЖ	96,3	62,1	81,7	54,4	79,4	58,9	484,3	1225	742,3	1400	1667
ВЖ2	17,3	13,5	11,8	11,8	14,8	12,8	38,4	266,3	82,4	304,4	362,3

Как видно из представленных в табл. 3 данных, по характеру разрушения проводники можно разделить на две группы. В первую входят медный, никелевый и нихромовый проводники. В этих проводниках к моменту взрыва выделяется энергии больше (а для медного проводника значительно больше), чем необходимо для их полного испарения. Это может свидетельствовать о том, что разрушение этих проводников носит, скорее всего, тепловой характер и связано с каким-либо механизмом испарения металла проводника. Для меди этот процесс может носить характер фазового перехода II рода, поскольку энергии выделяется вдвое больше, чем необходимо для спиноподобного распада.

Таблица 4

Металл	W_{B3}/W_0			W_{B3}/W_s		$(W_s/W_0)_{opt}$	$\bar{a}, 10^{-6} \text{ м}$	
	Эксп.	Теор.		b	s		b	s
		b	s					
Cu	0,83	0,29	0,4	2,85	2,08	0,29	0,013	0,033
Cu2	0,78	0,26	0,36	2,96	2,16	0,29	0,015	0,03
Ni	0,71	0,33	0,47	2,15	1,52	0,809	0,03	0,085
Ni2	0,89	0,78	1,1	1,15	0,81	0,809	0,2	0,56
Ti	0,31	1,44	2,02	0,21	0,15	1,6	30,5	84,3
Ti2	0,53	0,57	0,8	0,93	0,67	1,6	1,02	0,37
HX	0,54	0,35	0,48	1,11	1,55	2,77	0,08	0,22
HX2	0,69	0,6	0,84	1,15	0,82	2,77	0,2	0,54
ЭИ	0,71	1,33	1,58	0,53	0,45	3,39	1,98	3,33
ЭИ2	0,68	1,26	1,53	0,53	0,45	3,39	2,02	3,39
ВЖ	0,55	1,04	1,23	0,53	0,45	2,67	2,01	3,4
ВЖ2	0,34	1,25	1,49	0,27	0,23	2,67	15,1	25,5

Разрушение же проводников второй группы, включающей в себя проводники из титана и стали двух марок, необходимо связывать с другим механизмом, поскольку к моменту взрыва в них выделяется меньше энергии, чем необходимо для их полного испарения (в титановом проводнике – значительно меньше). Таким механизмом может быть развитие перегретой неустойчивости, которая, как показано в [5], развивается во взрывающихся проводниках вне зависимости от режима взрыва. Скоростная фоторегистрация взрыва проводников второй группы показывает, что, во-первых, процесс разрушения проводника происходит так же, как и для первой группы, практически одновременно по всему объему, то есть носит взрывной характер, а во-вторых, имеет регулярную неоднородную по длине коротковолновую возмущенную структуру. Перераспределение энергии в зонах с различной

электропроводностью в конечном итоге, по-видимому, и приводит к прекращению тока без полного (объемного) разрушения проводника.

В табл. 4 приведены некоторые энергетические соотношения, иллюстрирующие сказанное выше, а также расчетное отношение энергии сублимации проводника в оптимальном режиме к запасенной энергии, имеющее важное значение для понимания природы разрушения проводника при электровзрыве. В последних двух столбцах приведено расчетное значение среднего размера получаемых при взрыве частиц. Расчет проводился, как и в [1], по соотношениям, полученным в работе [6]. Все расчеты в табл. 4, как и выше, приведены для двух возможных сценариев теплового разрушения проводника.

Результаты таблицы свидетельствуют о том, что к моменту взрыва в оптимальном режиме в медном и никелевом проводниках выделяется почти вся запасенная энергия, в то время как для титанового проводника это соотношение составляет всего 30–50%. Отношение $(W_s/W_0)_{opt}$, как следует из табл. 4, является константой материала проводника, не зависящей от режима взрыва. Оно позволяет априори определять, для каких материалов возможен «одиночный» взрыв проводника, при котором к моменту взрыва в проводник вводится энергия, равная энергии сублимации, что достаточно важно для разработки методик получения нанодисперсных материалов [7].

Выводы. Таким образом, из приведенных в работе данных следует, что «одиночный», или оптимальный, режим взрыва проводников реализуется для всех исследованных материалов проводников. Механизм разрушения последних при этом может быть разный. Тем не менее соотношения [4] для определения оптимальных размеров проводников практически пригодны для всех этих проводников. В работе экспериментально установлено, что для оптимальных режимов взрыва проводников в жидкости существуют некоторые важные для понимания характера процесса взрыва соотношения, зависящие только от свойств материала проводника и не от внешних регулируемых параметров. Это отношение запасенной энергии к массе проводника $(W_0/m)_{opt}$ и отношение энергии сублимации к запасенной энергии $(W_s/W_0)_{opt}$. Первое из этих отношений можно использовать для определения оптимальных размеров и режимов взрыва проводника, второе – для определения режимов «одиночного» взрыва, при которых в проводник к моменту взрыва вводится энергия, равная энергии сублимации.

Расчет среднего размера частиц, получающихся при взрыве проводников, показывает, что эти размеры минимальны для оптимальных режимов взрыва, причем они также не зависят от внешних параметров, а зависят только от свойств металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кускова Н.И., Бакларь В.Ю., Гордиенко В.И., Хайнацкий С.А. О получении ультрадисперсных порошков металлов при электрическом взрыве проводников в жидкости. Часть I. Особенности взрыва проводников в жидкости // Электронная обработка материалов. 2008. № 1. С. 44–50.
2. Bennett F.D., Burden H.S., Shear // Phys. Fluids. 1962. № 5. P.102.
3. Oktay E. // Rev.Sci.Instrum. 1965. № 36. P. 1327–1328.
4. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова думка, 1986. 206 с.
5. Орешкин В.И. Перегревные неустойчивости при электрическом взрыве проводников // Письма в журнал технической физики. 2009. Т. 25. Вып. 1. С. 76–82.
6. Яворовский Н.А. Электрический взрыв проводников – метод получения ультрадисперсных порошков: Автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.14.12 / Томский политехнический институт им. С.М.Кирова. Томск, 1982. 24 с.
7. Sedoi V.S., Ivanov Yu.F. // Nanotechnology. 2008. №19. P. 145–710.

Поступила 12.01.09

Summary

The electric explosion of different metallic conductors was experimentally explored in a liquid at the optimum mode. The terms of the optimum mode's realization of conductors' explosion were certain, when all energy, stocked in a condenser, was entered into conductor during the first semi-period of discharge. It was discovered that specific energy, entered into conductor at the optimum mode, does not depend on conductor's sizes and parameters of discharge contour. Correlation, showing what amount of energy can be entered into conductor at the process of it's explosion at the optimum mode was got. It is shown that the size of particles, getting in the process of explosion of conductor at the optimum mode, depends only on properties of metal.