

## О ПОЛУЧЕНИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ В ЖИДКОСТИ. Часть III. ОПТИМАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ В ГАЗАХ. СРАВНЕНИЕ СО ВЗРЫВОМ В ЖИДКОСТИ

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

Установлено [1, 2], что расчетные значения среднего размера частиц, получающихся при электрическом взрыве проводников (ЭВП) в жидкости, минимальны для оптимальных режимов взрыва, при этом они зависят не от внешних регулируемых параметров разрядного контура и проводников, а только от свойств металла. Этот факт является следствием того, что два важных энергетических параметра взрыва – удельная запасенная энергия  $W_0/m$  и отношение энергии сублимации металла проводника к запасенной энергии  $W_s/W_0$  для оптимальных режимов ЭВП – также не зависят ни от длины или диаметра проводника, ни от начального напряжения  $U_0$ , емкости конденсаторной батареи  $C$  или индуктивности контура  $L$  [1]. Размеры частиц, получаемых в процессе ЭВП, рассчитывались, как и в первой части работы [2], по аппроксимационной формуле для взрыва проводников в газах [3]. В этой работе показано, что среднечисловой диаметр частиц, получаемых при ЭВП в газах, зависит от отношения плотности энергии, введенной в проводник, к энергии сублимации металла.

С учетом результатов, полученных ранее, цель настоящего исследования – поиск оптимальных параметров взрыва проводников в воздухе, установление характера различий и схожести с оптимальными параметрами взрыва проводников в воде, а также возможных причин этих различий. Это позволит определить, как влияет окружающая среда на размеры частиц при ЭВП.

Технические аспекты методики эксперимента применялись те же, что и во второй части статьи. Порядок работ был следующий. По известным соотношениям [4] для определенного набора электротехнических параметров находились оптимальные размеры для взрыва никелевого или никель-хромового проводника в воде. Затем проводник при тех же параметрах взрывался в воздухе. И, наконец, при тех же электротехнических параметрах находились геометрические размеры проводника, для которого режим электрического взрыва (ЭВ) в воздухе также являлся максимально близким к согласованному. Поиск согласованного режима для каждого из проводников велся за счет варьирования его длиной при неизменном диаметре в  $RLC$ -контуре с параметрами: начальное напряжение на конденсаторной батарее  $U_0 = 9$  кВ, емкость конденсаторной батареи  $C = 6$  мкФ, индуктивность разрядного контура  $L = 3,32$  мкГн.

**Результаты экспериментальных исследований.** Представленные в работе табл. 1–4 содержат результаты взрыва проводников при полностью одинаковых наборах параметров в воде и воздухе (причем для взрыва проводника в воде режим является согласованным), а также результаты взрыва проводников в воздухе в оптимальном режиме. Поэтому в первом столбце таблицы металл взрываемого проводника указывается с индексами, отвечающими этим ситуациям. Причем индекс “2” соответствует размерам проводника, взорванного в воде в оптимальном для указанного выше набора значений электротехнических параметров режима, поэтому она сохранена. Индексом “3” обозначаются результаты взрыва проводника при тех же параметрах в воздухе и индексом “4” – взрыв проводника в воздухе при параметрах, наиболее близких (по виду осциллограмм тока и напряжения) к оптимальным.

В табл. 1 представлены расчетные и экспериментальные характеристики взрывааемых проводников: диаметр  $d$ , длина  $l$ , критерии подобия  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  и  $\Pi_3$  и отношение запасенной энергии  $W_0$  к массе взрываемого проводника  $m$ . Критерии подобия, как и значения оптимальной длины и диаметра, вычислялись по формулам [4] для взрыва проводников в воде. Для этого набора параметров оптимальный диаметр никелевого проводника  $d_{opt}$  по [4] равен 0,28 мм, для никрома – 0,55 мм. Оптимальная

длина согласно [4] не зависит от материала проводника, поэтому для взрыва проводников в воде при выбранных параметрах контура она одинакова – 38 мм. Оптимальное отношение запасенной энергии к массе проводника  $W_0/m_{онм}$ , рассчитанное по [5], для никеля составляет 11,98 кДж/г, для нихрома – 3,325 кДж/г. Поэтому для экспериментов с никелем изначально были взяты проводники с  $d = 0,3$  мм и  $l = 38$  мм. Вид осциллограмм тока и напряжения, а также значение отношения запасенной энергии к массе проводника подтверждают, что такой режим взрыва никелевого проводника в воде близок к оптимальному. Для нихромового проводника ближе к оптимальному оказался режим, при котором длина проводника составляла 28 мм. Это связано, по-видимому, с большой разницей в значениях оптимального и реального ( $d = 0,3$  мм) диаметра проводника.

Таблица 1

Металл	$d$ , мм	$l$ , мм	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$W_0/m$ , кДж/г
Ni <sub>2</sub>	0,3	38	0,149	0,151	0,04	10,34
Ni <sub>3</sub>	0,3	38	0,149	0,151	0,04	10,34
Ni <sub>4</sub>	0,3	50	0,165	0,151	0,07	7,86
NiCr <sub>2</sub>	0,3	28	0,7	2,34	0,02	15,3
NiCr <sub>3</sub>	0,3	28	0,7	2,34	0,02	15,3
NiCr <sub>4</sub>	0,3	55	1,27	2,34	0,08	7,81

В соответствии с [4] критерии  $P_1$  и  $P_3$  равны для проводников одинаковой длины, а  $P_2$  – для всех проводников из одного материала, поскольку диаметр проволок в этих опытах не менялся. Таким образом, электрические характеристики (ток и напряжение) для взрыва одинаковых проводников в воде и воздухе должны совпадать, а для взрыва проводника большей длины (Ni<sub>4</sub> и NiCr<sub>4</sub>) сильно отличаться. На самом деле сравнение полученных осциллограмм тока и напряжения свидетельствует о существенных различиях в осциллограммах при взрыве одинаковых проводников в воде и воздухе, и минимальных – при ЭВ проводников в воде, и значительно более длинных – в воздухе. При взрыве в воздухе никелевого проводника с параметрами, полностью соответствующими параметрам согласованного режима взрыва в воде, меняется характер спада тока в момент взрыва, а также появляется участок, соответствующий дуговой стадии разряда, – разряд становится затухающим периодическим. И наоборот, при взрыве в воздухе более длинного проводника режим разряда становится аperiodическим, достаточно близким по своим характеристикам к согласованному режиму. Как уже упоминалось в первой части статьи [2], в соотношениях, по которым определяют оптимальные длину и диаметр проводника, а также в критериях подобия ЭВ отсутствуют параметры окружающей среды. Представленный в табл. 1 экспериментальный материал свидетельствует о том, что зависимость характеристик ЭВ от агрегатного состояния окружающей проводник среды все же есть, поэтому для взрыва проводников в воздухе эти соотношения использовать не вполне корректно. Это подтверждается видом осциллограмм тока и напряжения.

Существенное увеличение значения критерия  $P_3$  при взрыве никелевого проводника в воздухе в режиме, близком к оптимальному (по виду осциллограмм), и отличие экспериментального значения отношения  $W_0/m$  от установленного в предыдущей части работы для оптимального режима позволяет сделать вывод, что для выхода на оптимальные параметры следует уменьшить диаметр проводника. Таким образом, для определения оптимальных параметров проводника, взрываемого в воздухе, по параметрам взрыва в воде следует длину проводника увеличить примерно в 1,35 раза, а его диаметр уменьшить примерно в 1,12–1,13 раза.

Для нихромового проводника в целом проявились те же тенденции, хотя результаты не столь очевидны, как для никеля. Это связано с тем, что для опытов использовался проводник, диаметр которого для данного набора параметров существенно отличался от оптимального. Найденный режим, близкий к оптимальному, был реализован при длине проводника вдвое большей, чем для аналогичного режима в воде. При этом отношение  $W_0/m$  оказалось почти вдвое меньше. Характер осциллограмм для нихромовых проводников отличается от аналогичных режимов для никелевых проводников. Вместо резких изломов на стадии плавления проводника, характерных для никеля, на осциллограммах напряжения при взрыве нихромового проводника – гладкие изгибы, но участок снижения падения напряжения также присутствует. Зато на осциллограммах тока изгиб на стадии взрыва более резкий. Опыты с нихромовыми проводниками подтверждают, что для получения оптимального режима взрыва проводника в воздухе, подобного взрыву в воде, следует увеличивать длину проводника и уменьшать его диаметр.

Временные и амплитудные характеристики процесса взрыва представлены в табл. 2.

Таблица 2

Металл	$t_{вз}$ , мкс	$I_m$ , кА	$U_m$ , кВ	$N_{m1}$ , МВт	$N_{m2}$ , МВт	$R_m/R_0$	$\bar{U}_m$	$\bar{U}_m^e$	$\bar{I}_m$	$\bar{I}_m^e$
Ni2	9,59	8,99	9,45	40,7	40	93,4	3,2	1,05	0,8	0,74
Ni3	9,39	9,31	12,74	40	59	93,4	3,2	1,42	0,8	0,77
Ni4	9,39	8,39	11,64	36	22	41,3	3,85	1,29	0,8	0,69
NiCr2	8,05	7,32	10	27,6	55	4,3	5,04	1,11	0,4	0,605
NiCr3	8,55	7,35	14,6	30	69	5,6	5,04	1,62	0,4	0,607
NiCr4	9,6	6	16,9	32	43	12,2	7,99	1,88	0,4	0,496

Время достижения пика напряжения  $t_{вз}$  при взрыве проводников из обоих металлов при переходе из воды в воздух изменялось несущественно, фактически меньше погрешности эксперимента (развертка осциллографа в этих опытах была 5 мкс/дел.). Изменения максимальной амплитуды токового импульса  $I_m$  при сравнении взрыва одинаковых проводников в воде и воздухе аналогичны изменениям при переходе к более короткому (при прочих равных условиях) проводнику, а для оптимального режима в воздухе за уменьшение амплитуды как раз отвечает реальное увеличение при этом длины проводника. То же касается и пикового значения напряжения  $U_m$ . Это еще раз подтверждает сделанный выше вывод.

Мощность, вводимая в проводник для никелевого и нихромового проводников, в связи с наличием изломов на осциллограммах напряжения имеет два максимума. Первый максимум  $N_{m1}$  достигается в момент излома напряжения, примерно соответствующего началу плавления. Для взрыва проводника в воде в оптимальном режиме он сопоставим по величине со вторым («взрывным») пиком –  $N_{m2}$ , то есть сопротивление взрывающегося проводника согласуется с характеристическим сопротивлением разрядного контура, обеспечивая максимум мощности, дважды на протяжении активной стадии разряда. При взрыве такого же проводника в воздухе он на треть меньше, а для взрыва проводника в воздухе в оптимальном режиме он превосходит «взрывной» пик почти на 40% – то есть согласование происходит именно в этот момент (время, когда сопротивления равны, очень мало – порядка  $10^{-8}$  с, а диссипация энергии в проводнике должна быть максимальной именно в этот короткий промежуток времени). Этим ЭВП в никеле кардинально отличается от взрыва других проводников – скажем, медных, алюминиевых и т.п.

При взрыве нихромовых проводников, содержащих около 80% никеля, соотношения пиков на кривой мощности не сопоставимы с описанными выше. Пик мощности, отвечающий по времени стадии плавления, значительно меньше (в среднем в два раза), чем «взрывной». Для других никельсодержащих материалов, использовавшихся нами в опытах (стали ВЖ100 и ЭИ868), все процессы протекают примерно так же, как в «обычных» проводниках, несмотря на достаточно высокое – порядка 50–60% – содержание никеля.

По величине максимальной мощности, вводимой в проводник, можно оценить влияние окружающей среды на параметры взрыва проводника. По материалам табл. 2 видно, как она возрастает при взрыве проводника в воздухе. Для Ni этот рост составляет почти 50%, а для NiCr – около 25%. Динамическое сопротивление воды расширению проводника в предвзрывной стадии препятствует росту сопротивления проводника за счет увеличения его сечения, что соответственно понижает пик индуктивного перенапряжения и реактивную компоненту максимальной мощности, вводимой в проводник. Если же сравнить значения мощности, приведенные в табл. 2, с максимальной мощностью, которая может быть введена в омическую нагрузку в RLC-цепи, равную  $N_{max} = \frac{1}{2} U_0^2 C^{1/2} L^{-1/2} \cong 54,5$  МВт, то значения  $N_{m2}$  для Ni и NiCr выглядят явно нескомпенсированными.

Четыре последних столбца табл. 2 содержат безразмерные экспериментальные значения пика перенапряжения  $\bar{U}_m^e = U_m / U_0$  и максимального тока первой полуволны  $\bar{I}_m^e = \frac{I_m}{U_0} \sqrt{\frac{L}{C}}$ , а также их приближенные значения, полученные методами теории подобия в [4] ( $\bar{U}_m \approx 15\Pi_2^{1/4} \cdot \Pi_3^{1/3}$  и  $\bar{I}_m \approx 0,5\Pi_2^{-1/4}$ ), позволяющие уточнить необходимую корректировку оптимальных диаметра и длины проводника, а также критериев  $\Pi_2$  и  $\Pi_3$  при взрыве проводников в воздухе. Так, сравнение  $\bar{I}_m$  и  $\bar{I}_m^e$  для никеля подтверждает необходимость снижения оптимального диаметра проводника примерно в

1,12 раза, а критерия  $\Pi_2$  – в 1,6 раза. Сравнение безразмерных значений максимального тока и напряжения позволяет сделать вывод о необходимости увеличения оптимальной длины в 1,35 раза и уменьшения  $\Pi_3$  примерно в 3 раза.

Для нихромового проводника не все так однозначно, как для никелевого. Частично приведенные данные подтверждают те же выводы, частично – нет. Не исключено, что не все табличные материалы, использовавшиеся нами для расчета характеристик проводника, соответствуют свойствам материала проволочек, использовавшихся в опытах.

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 процесса – равновесного испарения (обозначено буквой b) и спиноподобного распада (обозначено буквой s).

Таблица 3

Ме- талл	$W_1$ , Дж		$W_2$ , Дж		$W_3$ , Дж		$W_4$ , Дж		$W_s$		
	Эксп.	Теор.	Эксп.	Теор.	Эксп.	Теор.	Эксп.	Теор.	Эксп.	Теор.	
										b	s
Ni2	5,25	14,99	23,11	7,13	46,2	13,9	141,4	152,4	216	188,4	266,1
Ni3	13,1	14,99	8,5	7,13	15,4	13,9	172,9	152,4	209,8	188,4	266,1
Ni4	19,2	19,7	11,1	9,4	19,1	18,3	128,1	200,5	177,4	247,9	350,1
NiCr2	19,7	10,9	14,5	5,1	34,6	11,2	98,6	118,8	167,4	145,9	203,6
NiCr3	9,8	10,9	10,9	5,1	16,6	11,2	148	118,8	185,3	145,9	203,6
NiCr4	18,3	21,4	13,8	9,95	28,2	21,9	157,7	233,3	218	286,5	400

Взрыв никелевого проводника в воздухе с параметрами, полностью соответствующими согласованному режиму взрыва в воде, приводит к уменьшению доли энергии, выделившейся в проводнике к моменту пика напряжения. При этом идет перераспределение запасенной энергии на небольшой по амплитудам и длительности (до одного периода) участок, который обычно связывают с дуговой стадией разряда. Увеличение длины проводника до 50 мм приводит, как уже указывалось выше, к исчезновению этого участка, то есть вся (или большая ее часть) запасенная энергия выделяется в первом полупериоде разряда. Доля энергии, выделившейся в проводнике к моменту пика напряжения, при этом снижается до значений, меньших, чем необходимо для испарения всего материала проводника даже при равновесном кипении. Аналогичные результаты для взрыва проволочек из тугоплавких металлов описаны в [6]. При этом к моменту взрыва никелевых проводников в жидкости (в оптимальном режиме) в них выделяется энергии больше, чем необходимо для равновесного кипения. По данным табл. 3 видно, что в этом случае точка, соответствующая на диаграмме состояний началу взрыва металла, находится между кривой равновесия жидкость-пар (биноподобно) и кривой лабильности системы (спиноподобно). В этом состоит еще одно существенное различие в условиях реализации ЭВП в жидкости и газах. В рамках данной работы не обсуждается механизм разрушения проводника при электровзрыве, но, как попутный, напрашивается вывод о том, что в отсутствие (или при очень малом) динамического сопротивления окружающей среды решающую роль в этом случае могут играть собственные динамические свойства металла, «разогнанного» за счет теплового расширения при очень быстром (до  $10^9$  К/с) джоулевым нагреве. Тогда реально может реализоваться «зольный» механизм, предложенный в [6]. Размер получаемых частиц тогда должен быть существенно большим, чем при взрыве в жидкости, – порядка сотен нанометров. Уменьшается также общая доля энергии, выделившейся в проводнике на активной стадии разряда.

При взрыве нихромового проводника распределение введенной энергии (энтальпии проводника) по фазам взрыва примерно такое же. Это подтверждается материалами табл. 4, где приведены некоторые энергетические соотношения – отношение энергии, введенной в проводник к моменту взрыва (экспериментальное и расчетное), к запасенной энергии  $W_{вз}/W_0$  и энергии сублимации  $W_{вз}/W_s$ , максимально возможное отношение энергии сублимации к запасенной энергии в оптимальном режиме для каждого из проводников, рассчитанное по [5]. Из последнего отношения видно, что для никелевого проводника возможна реализация такого режима взрыва, при котором к моменту пика напряжения в проводник будет введена энергия, равная или большая, чем энергия сублимации, а для нихромового – нет. Правда, значение этого отношения, на наш взгляд, кажется все же завышенным в связи с возможной неточностью табличных данных для него.

В последнем столбце приведено расчетное значение среднего размера получаемых при взрыве частиц. Расчет проводился, как и в [1], по соотношениям, полученным в работе [3]. Все расчеты в табл. 4 приведены для одного сценария теплового разрушения проводника, поскольку, как показано выше, сценарий спинодального распада при взрыве никелевого, и особенно нихромового проводников маловероятен. Как видно, для «оптимальных» режимов взрыва проводников в воздухе значения размеров частиц резко увеличились. Это не может быть связано со сменой механизма разрушения проводника, поскольку такой механизм не заложен в соотношения для определения размера частиц [3]. Скорее всего, это очередное подтверждение того, что для получения «истинного» оптимального режима взрыва проводников в воздухе необходимо более точно изменить размеры взрывающегося проводника. Особенно это касается уменьшения его диаметра.

Таблица 4

Металл	$W_{вз}/W_0$			$W_{вз}/W_s$		$(W_s/W_0)_{opt}$	$\bar{a}, 10^{-6} \text{ м}$
	Эксп.	Теор.		$b$	$s$		
		$b$	$s$				
Ni <sub>2</sub>	0,89	0,78	1,1	1,15	0,81	0,809	0,2
Ni <sub>3</sub>	0,86	0,78	1,1	1,11	0,79	- " -	0,22
Ni <sub>4</sub>	0,73	1,02	1,44	0,72	0,51	- " -	0,82
NiCr <sub>2</sub>	0,69	0,6	0,84	1,15	0,82	2,77	0,2
NiCr <sub>3</sub>	0,76	0,6	0,84	1,27	0,91	- " -	0,15
NiCr <sub>4</sub>	0,9	1,2	1,6	0,76	0,54	- " -	0,68

**Выводы.** В работе установлено, что агрегатное состояние окружающей среды влияет на характер взрыва проводников вследствие различия в плотностях. Так, показано, что взрыв в воздухе проводников, размеры которых в точности совпадают с оптимальными (для конкретного набора электротехнических параметров) размерами для воды, рассчитанными по соотношениям [4], приводит к смене режима разряда от апериодического (согласованного) к затухающему периодическому.

Для реализации оптимального режима взрыва проводников в воздухе необходимо корректировать значения их размеров – длину следует увеличить примерно в 1,35 раза по сравнению с расчетной для воды, а диаметр уменьшить примерно в 1,12–1,13 раза. Корректировки требуют также и критерии подобия, характеризующие взрывную и дуговую стадии взрыва. Критерий  $P_2$  необходимо уменьшить в 1,6 раза, а  $P_3$  – примерно в 3 раза.

Изменение агрегатного состояния окружающей среды влияет на скорость и количество введенной в проводник энергии, а также, возможно, на смену механизма его разрушения.

Прямого влияния изменения плотности окружающей среды на средние размеры частиц металла проводника, получающихся при взрыве, нами не установлено.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хайнацкий С.А. Условия реализации оптимального режима электрического взрыва проводников в воде // Письма в журнал технической физики. 2009. Т. 35. Вып. 7. С. 15–20.
2. 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.
3. Котов Ю.А., Яворский Н.А. Исследование частиц, образующихся при электрическом взрыве проводников // Физика и химия обработки материалов. 1978. № 4. С. 24–29.
4. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова думка, 1986. 206 с.
5. Khainatskii S.A. Conditions for Realization of an Optimum Regime of the Electric Explosion of Conductors in Liquid // Technical Physics Letters, 2009, Vol. 35, No. 4, pp. 299–301. © Pleiades Publishing, Ltd., 2009.
6. Лебедев С.В., Савватимский А.И. Металлы в процессе быстрого нагревания электрическим током большой плотности // Успехи физических наук. 1984. Т. 144. Вып. 2. С. 215–250.

Поступила 05.05.09

#### Summary

The electric explosion of conductors, which contain a nickel, was experimentally explored in the air at the optimum mode. Comparison of results of explosion of conductors in the air and to water. It is shown that explosion in the air of conductors, fully identical blown up in water, results in changing of the mode of digit. The terms of the optimum mode's realization of conductors' explosion in the air necessary, were certain.