

## О ПОЛУЧЕНИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ В ЖИДКОСТИ. Часть I. ОСОБЕННОСТИ ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ В ЖИДКОСТИ

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

Одним из важных практических применений электрического взрыва проводников (ЭВП) является возможность получения с его помощью ультрадисперсных порошков (УДП) различных веществ, обладающих достаточной проводимостью, в частности металлов. Метод ЭВП позволяет достаточно просто получать высокодисперсные порошки химических соединений, незагрязненных посторонними примесями. Удастся осуществить ряд реакций между веществами, относительно инертными друг к другу (синтезировать такие химические соединения, получение которых другими методами затруднено).

Метод ЭВП заключается в испарении в какой-либо среде (воздухе, жидкости), к примеру, металлического образца с последующим быстрым охлаждением образующихся малых металлических частиц (ММЧ) в этой среде. Скорость охлаждения при этом может достигать величин  $10^{10}$ – $10^{15}$  К/с [1]. Условия взрыва проводника и охлаждения его продуктов определяют как размеры получаемых частиц, так зачастую и их химический состав.

**1. Условия однородности взрыва.** В зависимости от скорости и количества введенной энергии процесс взрыва может осуществляться различным способом. Для медных проводников при плотностях тока  $j \leq 10^{11}$  А/м<sup>2</sup> реализуется механизм разрушения проводника, связанный с развитием перетяжной магнитогидродинамической неустойчивости [2], то есть проводник взрывается неоднородно по оси, при этом в процессе его разрушения образуются довольно крупные фрагменты, размер которых соразмерим с начальным диаметром проводника. При значительно более высоких плотностях тока ( $j \sim 10^{13}$  А/м<sup>2</sup>) реализуется механизм взрыва, связанный с неоднородностью давления по сечению проводника [3], при котором проводник начинает испаряться с поверхности. В то же время не подлежит сомнению, что обеспечение условий осевой и радиальной однородностей взрыва проводников за счет выбора режима ЭВП и параметров проводника при получении УДП является достаточно важным условием для обеспечения минимальных размеров получаемых частиц.

Условия однородного (по оси и сечению) взрыва цилиндрических проводников в воздухе и воде исследовались в [3–6]. Для взрыва проводников в воздухе в [4] показано, что все параметры однородны вплоть до момента взрыва только для очень тонких проводников (диаметром  $\leq 0,1$  мм). Эксперименты в этой работе проводились при плотности тока  $j \cong 1 \cdot 10^7$  А/см<sup>2</sup>. В [5, 6] исследованы радиальная (скин, магнитное давление) и осевая (так называемая «силовая» – винтовая и перетяжная, а также перегревная) однородности проводников при подводном электровзрыве. В работе [6] показано, что при выборе «оптимальных» длины и диаметра все параметры проводника однородны в процессе взрыва – на всех стадиях нагрева, вплоть до перехода в плазменное состояние, т.е. условие оптимальности является условием однородности.

Условия оптимальности взрыва проводников, когда энергия, запасенная в конденсаторной батарее, выделяется в течение первого импульса тока разряда с максимальной скоростью, были получены в [1] из требования максимума мощности:

$$\begin{cases} d_{\text{опт}} = 2 \left[ \frac{W_0}{z\rho_n \sigma_{n0} (\lambda_n + \gamma_n)} \right]^{1/4} \\ l_{\text{опт}} = 2 \cdot 10^{-3} U_0 \sqrt[4]{LC} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $W_0$  – запасенная энергия конденсаторной батареи,  $W_0 = CU_0^2/2$ ;  $\rho_n$  – плотность,  $\sigma_{n0}$  – удельная электропроводность,  $\lambda_n$  – удельная теплота плавления,  $\gamma_n$  – удельная теплота парообразования металла проводника;  $z$  – волновое (или характеристическое) сопротивление цепи,  $z = \sqrt{L/C}$ ;  $U_0$  – начальное напряжение на конденсаторной батарее,  $C$  – емкость конденсаторной батареи;  $L$  – индуктивность разрядного контура. При переходе через оптимальный режим (например, уменьшение напряжения) происходит смена механизма взрыва, то есть он становится неоднородным. Как видно из (1), оптимальная длина проводника не зависит от характеристик проводника и при одинаковых параметрах контура для всех взрывааемых проводников одинакова, в то время как оптимальный диаметр  $d_{\text{опт}}$  существенно зависит от физических характеристик проводника.

Кроме условий оптимальности взрыва проводников, для анализа характера взрыва на каждой из его стадий мы использовали критерии подобия электрических характеристик взрыва, полученные тем же автором [1]:  $\Pi_1$  (характеризующий приближенное подобие начальной стадии взрыва),  $\Pi_2$  (определяющий фазу взрыва) и  $\Pi_3$  (определяющий подобие следующей за взрывом стадии). Последний критерий существенно зависит от длины проводника, поэтому при соответствующем выборе параметров можно рассчитывать на то, что «дуговая» стадия взрыва будет для всех проводников подобной или близкой к этому.

Строго говоря, соотношения (1) и критерии подобия были получены для алюминиевых и медных проводников, и их пригодность для взрыва проводников из других материалов еще предстоит установить.

**2. Характер диспергирования металлов при взрыве проводников.** Расчет параметров контура и проводника, сделанный по формулам (1), позволяет выбрать режим взрыва, обеспечивающий равномерный нагрев проводника как по длине, так и по сечению вплоть до начала испарения. При этом скорость выделения энергии в проводнике является максимально возможной для всех параметров, удовлетворяющих этим соотношениям.

По данным [7], при оптимальных параметрах для медных проводников в воде энергия, выделившаяся к моменту взрыва, примерно на 50% превышает энергию сублимации. Естественно предположить, что вся масса металла к этому моменту переходит в паровую фазу, причем, по-видимому, может реализоваться ситуация, когда фазовая траектория огибает критическую точку. Последующий рост высокодисперсных частиц происходит по двум возможным механизмам: либо при расширении продуктов взрыва пар переохлаждается и развивается процесс гомогенного образования жидкой фазы, либо при охлаждении пара столкновение атомов, молекул или молекулярных комплексов приводит к возникновению связанного состояния и последующего увеличения зародышей. В любом случае образовавшиеся в результате объемной конденсации или формирования кластеров малые металлические частицы обычно имеют сферическую форму и средние размеры в интервале 10—100 нм [8]. Подробный анализ работ, посвященных рассмотрению электрического взрыва проводников как способа получения дисперсных порошков, и результаты собственных экспериментальных исследований, представленные в [7], позволили установить, что средний размер ММЧ определяется временно-энергетическими параметрами данного метода, а их фазовый состав и структурное состояние – размером образующихся частиц и физико-химическими свойствами рабочей среды. Изменяя эти параметры, можно получать ММЧ в различном структурном состоянии: кристаллическом, квазикристаллическом, аморфном, аморфно-кристаллическом. Используя в качестве рабочей среды различные жидкости, можно получать ММЧ в виде чистых исходных металлов или их химических соединений с продуктами разложения этих жидкостей.

Зависимость среднечислового диаметра частиц от введенной в проводник энергии, полученная в [8], аппроксимируется выражением

$$\bar{a} = 0,3 \cdot 10^{-6} (e/W_s)^3, \text{ м}, \quad (2)$$

где  $\bar{a}$  – среднечисловой диаметр частиц;  $e$  – плотность энергии, введенной в проводник;  $W_s$  – энергия сублимации металла. Эксперименты проводились для алюминиевых и медных проводников в газах аргоне и водороде при давлениях  $(1-9) \cdot 10^5$  Па. Форма образующихся частиц – сферическая (в т.ч. и в экспериментах, где проходили химические реакции), давление и род газа, окружающего проводник, не оказывают влияния на размер частиц. В [9] содержится утверждение, что переход от взрывов с  $e/W_s > 1$  к взрывам с  $e/W_s < 1$  может привести к смене механизма образования частиц от конденсационного к коагуляционному, что проявится в их размерах и форме. Учитывая, что при этом может измениться механизм взрыва (появление неустойчивостей, неоднородный взрыв и т.п.), это тем более должно быть заметно.

Результаты эксперимента в [10] показывают, что при  $e/W_s \sim 2$  средний размер получаемых частиц  $\bar{a} \sim 30$  нм, при 1,5 – 50–60 нм, 1 – 300 нм, 0,7–0,8 – > 600 нм. Если принять во внимание результаты [7], для взрыва медного проводника в жидкости в соответствии с (2) можно получить ММЧ размерами примерно 50–60 нм. Однако, учитывая, что скорости охлаждения частиц при взрыве проводников в жидкости на несколько порядков выше, чем в газах, следует ожидать, что эти размеры могут достигать значений 0,5–1 нм.

Применение соотношения (2) для предварительных оценок и сравнения результатов опытов в жидкости и газах в какой-то мере оправдано ввиду того, что, согласно [1], форма и величина первого импульса тока при взрыве определяются процессами, происходящими в самом проводнике, и мало зависят от характера окружающей среды, поэтому для взрыва в жидкости и газах идентичны. Соотношение (2), которое по результатам цитированных работ хорошо аппроксимирует экспериментальные результаты, к сожалению, содержит априорно не определяемый параметр  $e$ . Поэтому одной из задач исследования особенностей взрыва проводников в жидкости могло бы быть определение ряда макроскопических параметров или их сочетания, которые позволили бы определять примерное распределение частиц по размерам для различных металлов, исходя из заданных до опыта электротехнических параметров контура и свойств проводника, или установление какой-либо корреляции с этими параметрами.

**3. Результаты экспериментальных исследований.** Для определения особенностей взрыва металлических проводников в жидкости были взяты проводники, теплофизические и электрофизические параметры которых различаются в широком диапазоне. Это медные проводники, исследованные достаточно подробно, и проводники, содержащие сплавы никеля (в т.ч. и химически чистый Ni) и титана. Взрыв проводников осуществлялся в дистиллированной воде, при этом параметры RLC-контура были следующими: начальное напряжение на конденсаторной батарее  $U_0 \cong 30$  кВ, емкость батареи  $C = 3$  мкФ, индуктивность контура  $L \cong 3$  мкГн (период собственных колебаний контура  $T = 2\pi\sqrt{LC} \cong 18,85$  мкс, характеристическое сопротивление – 1 Ом, запасенная энергия  $W_0 = 1350$  Дж). Для цилиндрических проводников (меди, никеля, нихрома) был выбран диаметр  $d \cong 0,3$  мм, для фольги (титан и жаропрочные стали марки ЭИ-868 (ВЖ98) и ВЖ100) ширина подбиралась таким образом, чтобы площадь сечения была такой же, как и у проволочек, – около  $7 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>. Длина всех проводников  $l = 80$  мм. Эти параметры достаточно близки к оптимальным для всех проводников, использовавшихся в опытах. Некоторое их отличие от оптимальных было допущено преднамеренно для оценки влияния дуговой стадии на средние размеры получаемых ММЧ. Для регистрации тока и напряжения использовались резистивный делитель напряжения, малоиндуктивный шунт, осциллограф С8-17. Опыты для каждого из взрывааемых проводников повторялись не менее чем 5 раз. Разброс электрических измерений составлял менее 2–3%. На медных и никелевых проводниках было проверено, насколько соответствуют электрофизические характеристики взрыва для проводников круглого сечения и узкой ( $l \gg h$ ) фольги. При выбранных нами параметрах опытов они оказались практически идентичными.

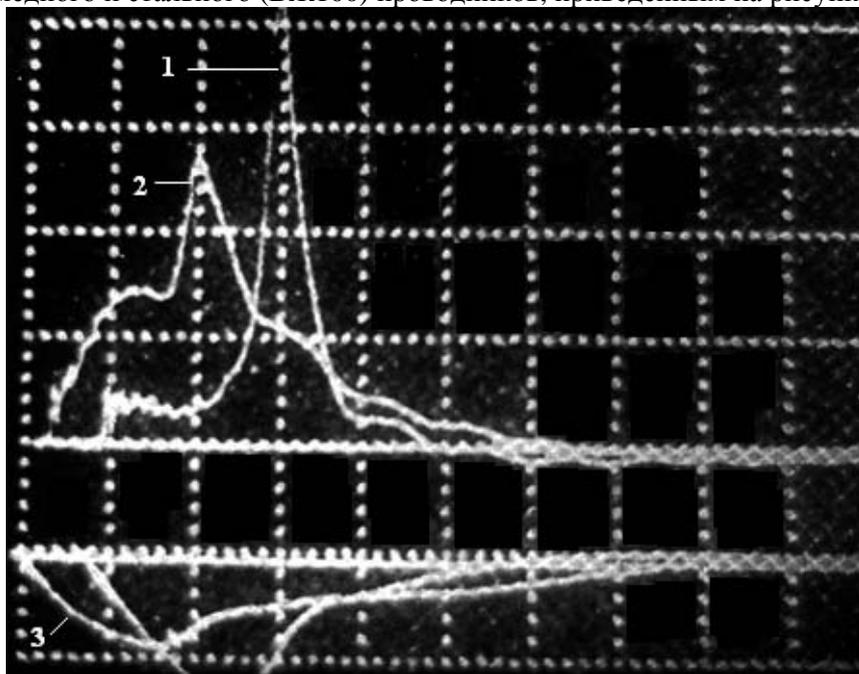
По осциллограммам тока и напряжения велся расчет энергетических параметров каждой стадии взрыва. За момент взрыва проводника в жидкости в соответствии с [7] нами принимался момент пика перенапряжения.

В табл. 1 представлены некоторые результаты измерений и рассчитанные по ним параметры взрыва: оптимальный диаметр проводника  $d_{\text{опт}}$ , критерии подобия  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , отношение запасенной энергии  $W_0$  к массе проводника  $m$ , энергия, выделившаяся на активной стадии разряда (без учета потерь в элементах цепи и реактивных потерь)  $W_a$ , максимальные значения тока  $I_m$  и напряжения  $U_m$ , а также приведенное к начальному максимальное значение сопротивления взрывающегося проводника.

Таблица 1

Металл	$d_{\text{опт}}$ , мм	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$W_0/m$ , МДж/кг	$W_a$ , Дж	$I_m$ , кА	$U_m$ , кВ	$R_{\text{max}}/R_0$
Cu	0,3	0,12	0,21	27,0	787,9	15	50,7	200
Ni	0,44	0,21	0,91	27,3	783,1	11	41,5	35
Ti	0,71	0,67	6,46	53,6	673,5	8	24,6	7,7
НХ	0,79	1,37	9,68	29,8	753,6	10	35,4	13,8
ЭИ	0,72	1,48	6,55	26,1	607,1	6	29	4,5
ВЖ	0,63	0,93	3,84	26,0	719,7	9	30	4,4

Оптимальная длина для всех проводников одинакова –  $l_{\text{опт}} = 104$  мм, критерий подобия  $\Pi_3 \approx 0,024$  отличается в шестом знаке, то есть дуговая стадия взрыва не сильно различается для всех проводников, поскольку их длины равны. Оптимальные диаметры проводников, как видно из таблицы, существенно отличаются. Значительно отличаются и критерии подобия, «отвечающие» за начальную стадию и фазу взрыва, что вполне соответствует характеру протекания этих процессов в различных проводниках. Об этом можно судить по совмещенным осциллограммам тока и напряжения при взрыве медного и стального (ВЖ100) проводников, приведенным на рисунке.



Совмещенные осциллограммы тока и напряжения при взрыве медного и стального (ВЖ100) проводников. 1 – осциллограмма напряжения, медь; 2 – осциллограмма напряжения, сталь; 3 – осциллограмма тока, медь

Ряд, построенный для различных проводников по мере убывания  $W_a$  (Cu>Ni>нихром>ВЖ>Ti>ЭИ), тождествен ряду по  $I_m$  и коррелирует с рядом по  $R_{\text{max}}/R_0$  – здесь отличия наблюдаются только для «хвоста» ряда. Количество энергии, выделившейся на проводнике и канале разряда в процессе взрыва (то, что мы называем активной стадией разряда), и максимальный ток, безусловно, должны зависеть от характера изменения сопротивления проводника, поскольку от этого зависит, какая доля энергии диссипирует на элементах накопителя и разрядного контура. Ряд по  $U_m$  отличается тем, что на последнее место переместился титановый проводник. Взрыв медного, никелевого и нихромового проводников характеризуется пиком перенапряжения – для меди большим. Титановый проводник взрывается при напряжении, существенно меньшем, чем начальное напряжение конденсаторной батареи.

Отношение максимального сопротивления к начальному для меди и никеля хорошо коррелирует с известными результатами [1, 6]. При этом для никеля фазовый переход II рода и изменение температурного коэффициента сопротивления в районе 630 К на ходе кривой сопротивления не сказываются. Для стальных, титановых и нихромовых проводников не существует четкого излома кривой  $R(t)$  в момент начала плавления.

Временные характеристики процесса взрыва представлены в табл. 2. Здесь  $t_1$  – время достижения первого максимума тока,  $t_{\text{вз}}$  – время взрыва (соответствует пику перенапряжения),  $t_m$  – время достижения максимума скорости выделения энергии  $W_i/t_i$ . Поскольку время, соответствующее пику мощности  $N_{\text{max}}$ , для всех металлов практически совпадает с  $t_{\text{вз}}$  – временем взрыва, в табл. 2 оно не приведено.

Анализ приведенных в табл. 1 и 2 экспериментальных данных позволяет выделить три пары металлов, наиболее близких по представленным в них параметрам взрыва. Это Cu и Ni, нихром и сталь ВЖ100, Ti и сталь ЭИ-868. Причем по всем тепло- и электрофизическим параметрам металлы третьей пары достаточно сильно отличаются друг от друга. Эти металлы характеризуются тем, что проводники из них взрываются при напряжении, меньшем, чем  $U_0$ , при этом стадия взрыва, за которую «отвечает»  $\Pi_2$ , для них различается незначительно. Соответственно вид осциллограмм тока и

напряжения для этих проводников почти идентичен. Следует также отметить, что если ряд по мере убывания  $W_a$  тождествен ряду по  $I_m$ , то ряд по  $N_{max}$  – ряду по  $U_m$ .

Таблица 2

Ме-талл	$t_i$ , мкс	$t_{вз}$ , мкс	$N_{max}$ , $10^8$ Вт	$t_m$ , мкс	$W_i/t_i$ , $10^8$ Дж/с
Cu	3,9	4,5	6,7	5	1,5
Ni	3,0	3,0	4,2	3,9	1,5
Ti	2,8	3,03	1,6	3,9	1,1
НХ	3,6	3,73	2,72	5	1,3
ЭИ	2,7	2,89	1,61	3,5	1
ВЖ	3,4	3,81	2,51	4,6	1,3

В табл. 3 приведены значения энергии, выделившейся на различных стадиях взрыва проводника. Здесь  $W_1$  – энергия, затраченная на нагрев проводника до температуры плавления,  $W_2$  – на плавление,  $W_3$  – на нагрев до температуры кипения,  $W_4$  – на кипение. Экспериментальные значения указанных величин рассчитывались по осциллограммам, теоретические – это приближенный расчет с постоянными коэффициентами. Энергия сублимации (полного испарения) проводника  $W_s$  рассчитывалась для двух возможных (крайних) случаев – когда проводник испаряется равномерно – по линии бинодали (b) и когда происходит спиноподобный распад проводника (s). В качестве экспериментального значения  $W_s$  бралась энергия, выделившаяся в проводнике к моменту взрыва. В ряде случаев для различных проводников на осциллограммах напряжения отсутствовали четкие характерные изломы, соответствующие фазовым переходам, что вызывало затруднения в определении соответствующих характеристик. Это, а также некоторые трудности с определением необходимых временных интервалов могли вызвать расхождения между теоретическими и экспериментальными данными.

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
Cu	23,5	21,1	27,5	10,3	66,9	29,5	329,2	241,6	447,1	302,5	415,4
Ni	47,1	31,6	30,2	15,0	82,1	29,3	161,5	320,8	320,9	396,6	560,1
Ti	18,9	22,0	20,4	8,2	16,8	21,2	214	226,2	270,1	277,6	389,6
НХ	22,8	31,1	12,2	14,5	35	31,9	301,5	339,3	371,8	416,7	581,8
ЭИ	26,3	28,0	22,4	25,1	26,9	27,0	191,3	562,3	266,9	642,5	763,9
ВЖ	22,8	29,2	21,1	25,5	25,4	27,7	296,9	575,1	366,2	617,1	733,5

По данным табл. 3 можно предположить, что проводники испаряются скорее всего равномерно (возможно, за исключением медных), хотя заведомо известно, что теоретический расчет в наших приближениях дает завышенные значения энергии сублимации. Определенной проблемой является также точность теплофизических табличных данных для «экстремальных» состояний металлов, например критическая температура или удельная теплота испарения для тугоплавких металлов. Поэтому результаты, приведенные в табл. 3, можно рассматривать только как оценочные.

В табл. 4 приведен ряд энергетических соотношений, определяющих как характер взрыва, так и возможный размер получаемых металлических частиц. В столбцах 2–4 дано отношение энергии сублимации  $W_s$  (расчетной – по двум возможным процессам и экспериментальной) к запасенной –  $W_0$ . В столбцах 5 и 6 приведено отношение энергии, выделившейся в проводнике к моменту взрыва  $W_{вз}$  (определенной по осциллограммам), к  $W_s$ , рассчитанной по двум процессам. В столбцах 7–9 приведено отношение энергии сублимации к энергии «дугового разряда», которое оценивалось как  $W_s/(W_0 - W_s)$ . Десятый столбец содержит отношение энергии взрыва к энергии «дугового разряда», рассчитанное по соотношению  $W_{sa} = W_{вз}/(W_a - W_{вз})$ , где  $W_a$  – экспериментально определенная суммарная энергия, выделившаяся на активной стадии в канале разряда (без учета потерь в элементах разрядной цепи). Столбцы 11 и 12 содержат значения среднечислового диаметра частиц, рассчитанные по (2). Плотность энергии, введенной в проводник к моменту взрыва, рассчитывалась по осциллограммам тока и напряжения, энергия сублимации бралась для бинодали и спиноподобного распада.

По данным табл. 4, по-прежнему наиболее близкие параметры взрыва наблюдаются для тех же пар проводников – медь и никель, титан и ЭИ-868, нихром и ВЖ100. Это подтверждается и видом

осциллограмм. Для титана и ЭИ-868 вид осциллограмм тока и напряжения почти идентичен, для никрома и ВЖ100 они очень близки. Осциллограммы напряжения для меди и никеля подобны по форме, но довольно сильно отличаются величиной и длительностью «полки», соответствующей плавлению.

Таблица 4

Металл	$W_s/W_0$			$W_{вз}/W_s$		$W_s/W_d$			$W_{sa}$	$\bar{a}, 10^{-6} \text{ м}$	
	Эксп.	Теор.				Эксп.	Теор.			b	s
		b	s	b	s						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Cu	0,39	0,23	0,32	1,64	1,2	0,65	0,3	0,47	1,71	0,07	0,18
Ni	0,25	0,31	0,44	0,81	0,57	0,34	0,46	0,8	0,78	0,57	1,61
Ti	0,20	0,21	0,29	0,97	0,69	0,25	0,26	0,41	0,67	0,33	0,9
НХ	0,28	0,31	0,43	0,89	0,64	0,38	0,45	0,76	0,97	0,42	1,1
ЭИ	0,18	0,48	0,57	0,38	0,32	0,22	0,91	1,3	0,66	5,59	9,4
ВЖ	0,27	0,49	0,58	0,56	0,47	0,37	0,95	1,38	1,04	1,74	2,93

Данные табл. 4 еще раз подтверждают, что при выбранных в эксперименте параметрах процесс испарения проводников происходит равновесно. С учетом потерь в цепи при взрыве проводников можно предположить, что для медных, никромовых и стальных (ВЖ100) проводников основная доля энергии выделяется на стадии взрыва, в то время как для остальных трех продукты взрыва существенно «догреваются» на дуговой стадии. Возможно, для них необходимо определять момент взрыва по другим критериям – скажем, по моменту появления излома на спадающей части напряжения.

Что касается расчетных значений среднего размера частиц, то они наименьшие для медных проводников. Ряд по мере убывания  $\bar{a}$ : ЭИ > ВЖ > Ni > никром > Ti > Cu совпадает для расчета  $W_s$  по обоим возможным процессам. Утверждение о том, что  $\bar{a}$  монотонно убывает с ростом плотности введенной в проводник энергии [9], в нашем случае не подтверждается – ряд по  $W_s$  имеет вид ЭИ < Ti < Ni < ВЖ < никром < Cu (напомним, что все проводники имели одинаковый объем). Совпадают только крайние точки обоих рядов – остальные проводники этой закономерности не подчиняются. Расчетный (и соответственно экспериментальный) размер частиц более точно коррелирует с плотностью энергии, введенной к моменту взрыва в единицу массы проводника, – в этом случае «выпадает» из ряда только Ti. Однако окончательный вывод о корреляции значения среднечислового диаметра частиц, рассчитанных по (2), с тепло- или электрофизическими параметрами металлов делать преждевременно. Интуитивно понятен только минимальный размер частиц для Cu – у этого металла, в отличие от других, наименьшие температура кипения и теплота парообразования. Для Ti, ввиду относительно небольшой плотности, достаточно велики все удельные характеристики, но в рамках нашего опыта на размерах частиц это не сказалось. Не удалось выявить также зависимость от каких-либо параметров «внутри» группы сплавов Ni – ни от концентрации никеля, ни от характеристик примесей.

Интересно было проверить влияние дуговой стадии разряда на размер частиц, отмеченное в [9], для наших результатов по взрыву проводников в воде. В соответствии с данными, приведенными в табл.4, отношение энергии, выделившейся к моменту взрыва  $W_{вз}$ , к энергии, выделившейся на дуговой стадии  $W_d$ , условно делит проводники на 3 группы. В первой – только медный проводник, у которого  $W_{sa} = 1,71$  – значение  $W_d$  вряд ли существенно. Далее – никром и ВЖ, для которых энергия  $W_d$  (включая, естественно, и энергию зажигания вторичного пробоя – а она немаленькая) примерно равна энергии взрыва проводника. И, наконец, Ni, Ti и ЭИ, для которых  $W_d > W_{вз}$ . То есть ряд по  $W_{sa}$  приобретает вид: ЭИ > Ti > Ni > никром  $\approx$  ВЖ > Cu – снова Ti и ВЖ поменялись местами. Таким образом, можно считать, что корреляция между дуговой стадией и размером частиц должна иметь место для ЭИ > Ni > никром > Cu (Ti и ВЖ выпали), причем зависимость, обратная приведенной в [9], – чем меньше энергии выделяется на дуговой стадии, тем меньше размер частиц. В этом, наверное, ничего удивительного нет – в формулу для расчета  $\bar{a}$  не входят параметры дуговой стадии.

Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными [10] показывает, что при  $e/W_s \sim 1,7$  для меди рассчитанный нами средний размер получаемых частиц  $\bar{a} \sim 70 \text{ нм}$  – примерно такой же, как в этой работе. Снимки материала взрыва проводников в воздухе и в воде при одних и тех же параметрах, сделанные на приборе «Неофот 1000», показали, что во втором случае распределение

частиц по размерам более однородное. Косвенные методики расчета среднечислового диаметра частиц по этим снимкам дали значения для  $\bar{a}$  в 3-4 раза меньшие, чем приведенные в табл.4, что свидетельствует о существенных различиях в условиях формирования ММЧ при взрыве проводников в газах и конденсированных средах.

С учетом того, что с точки зрения энергетических характеристик взрыва наши данные по взрыву проводников в воде достаточно сильно отличаются от приведенных в [8–10] для взрыва в газах, следует более детально установить различия (и схожие черты) параметров взрыва в зависимости от свойств окружающей среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова думка. 1986. 206 с.
2. *Колгатин С.Н., Лев М.Л., Перегуд Б.П., Степанов А.М., Федорова Т.А., Фурман А.С., Хачатурьянц А.В.* Разрушение медных проводников при протекании по ним тока плотностью, большей  $10^7$  А/см<sup>2</sup> // Журнал технической физики. 1989. Т. 59. Вып. 9. С. 123–133.
3. *Кускова Н.І., Ткаченко С.І.* Теоретичне дослідження динаміки фазових перетворень в результаті мікросекундних електричних вибухів провідників циліндричної форми // Український фізичний журнал. 1999. Т. 44. № 3. С. 351–356.
4. *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.
5. *Kuskova N.I., Tkachenko S.I., Koval S.V.* Investigation of Liquid Metallic Wire Heating Dynamics // Journ. Phys.: Condens. Matter. 1997. Vol. 9. P. 6175–6184.
6. *Ковавь С.В., Кривицкий Е.В., Раковский Г.Б.* Исследование высокотемпературных свойств металлов методом подводного электрического взрыва проводников. Николаев, 1989. 53 с. (Препринт / Проектно-конструкторское бюро электрогидравлики АН УССР; №7).
7. *Литвиненко В.П., Коваль С.В.* К вопросу о корреляции электрических и пространственно-временных характеристик электрического взрыва проводников // Журнал технической физики. 1983. № 4. С. 770–773.
8. *Яворовский Н.А.* Электрический взрыв проводников – метод получения ультрадисперсных порошков: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.14.12 / Томский политехнический институт им. С.М.Кирова. Томск, 1982. 24 с.
9. *Лернер М.И.* Управление процессом образования высокодисперсных частиц в условиях электрического взрыва проводников: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.14.12 / Томский политехнический институт им. С.М.Кирова. Томск, 1988. 21 с.
10. *Котов Ю.А., Яворский Н.А.* Исследование частиц, образующихся при электрическом взрыве проводников // Физика и химия обработки материалов. 1978. № 4. С. 24–29.

*Поступила 01.10.07*

## Summary

The features of electrical explosion and dispersion in the liquid of metallic conductors the parameters of thermodynamical and electric of which differentiate in a wide range were investigated. The experimental data analysis allowed selecting three pair of metals, most near on the got parameters of explosion. It is certain that the size of the got particles depends on the closeness of the energy entered to the moment of explosion in unit of mass of conductors. Reverse dependence between energy of arc stage of explosion and size of particles is set. Distributing of the got particles on sizes is more homogeneous, than at the explosion of conductors in gases.