

М.И. Баранов

ПОЛУЧЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МИКРОННЫМИ, СУБМИКРОННЫМИ И НАНОСТРУКТУРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ ВЕЩЕСТВА ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКОВ

Представлено результати експериментальних досліджень, пов'язаних з отриманням за допомогою електричного вибуху в технологічній камері з технічною водою тонких мідних дротів мікронних, субмікронних і наноструктурних струмопровідних утворень. Показано, що лінійні розміри таких дрібнодисперсних утворень при максимальній щільності імпульсного струму провідності в мідних дротах до 350 кА/мм² знаходяться в діапазоні від 10 нм до 10 мкм.

Представлены результаты экспериментальных исследований, связанных с получением при помощи электрического взрыва в технологической камере с технической водой тонких медных провололок микронных, субмикронных и наноструктурных токопроводящих образований. Показано, что линейные размеры таких мелкодисперсных образований при максимальной плотности импульсного тока проводимости в медных проволочках до 350 кА/мм² находятся в диапазоне от 10 нм до 10 мкм.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в различных областях прикладной науки и техники, во многих отраслях промышленного производства, в химии, биологии и медицине широкое применение находят дисперсные материалы, характеризующиеся той или иной степенью раздробленности своего вещества на частицы. Одним из перспективных методов получения широкой гаммы мелкодисперсных электропроводящих неорганических материалов является тот, который базируется на импульсном электрофизическом процессе электрического взрыва (ЭВ) тонких металлических проводников [1-4]. Электротехнология, основанная на ЭВ проводников в не- и конденсированных средах, получила название ЭВП-технологии. Основными преимуществами данной технологии являются [1-3]: 1) высокий КПД передачи электрической энергии от ее накопителя (обычно конденсаторного типа) к объему взрываемого (сублимируемого) металла проводников; 2) возможность регулирования параметров процесса ЭВ проводников для получения требуемой дисперсности их вещества и соответственно необходимых геометрических характеристик его частиц; 3) универсальность этого метода диспергирования материалов, позволяющего получать широкий спектр размерных показателей их частиц; 4) сравнительно невысокая относительно других физических методов диспергирования материалов стоимость высоковольтного электрофизического оборудования для осуществления ЭВП-технологии. Указанные выше достоинства ЭВП-технологии позволили за последние годы создать в ряде зарубежных стран (России, США и др.) опытное высоковольтное электрофизическое оборудование для производства дисперсных неорганических материалов методом электровзрыва металлических проводников [3,4]. В этой связи актуальной представляется автору задача по дальнейшему исследованию на имеющемся сейчас в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" отечественном мощном высоковольтном электрофизическом оборудовании возможностей электровзрывной технологии получения высокодисперсных материалов.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Используем для проведения экспериментальных исследований электротехнологических возможностей рассматриваемой ЭВП-технологии действующее высоковольтное электрофизическое оборудование, размещенное на исследовательско-испытательном полигоне НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" (п. Андреевка, Харьковской обл.) и содержащее мощный генератор тока искусственной молнии (ГТМ) [5]. В качестве объекта испытаний (ОИ) в проводимых экспериментах применим тонкие сплошные прямолинейные медные проволочки практически без изоляции наружным диаметром $d_k=0,2$ мм и длиной $l_k=100$ мм, погруженные в техническую воду технологической рабочей камеры (РК), схематически изображенной на рис. 1.

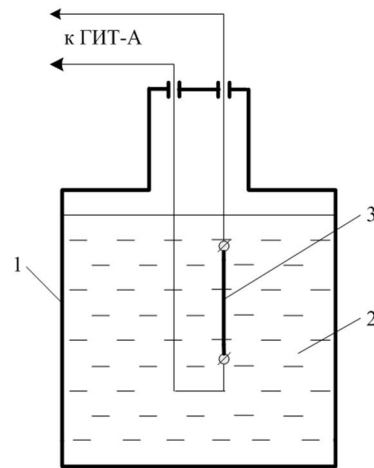


Рис. 1. Технологическая камера РК с электрически взрывающейся тонкой медной проволочкой в ее жидкой среде – технической воде (1 – изоляционная стенка камеры; 2 – жидкая среда (вода); 3 – взрывающийся тонкий провод)

Отметим, что высоковольтный ввод в технологическую камеру РК с технической водой объемом 1,5 л был выполнен при помощи радиочастотного кабеля марки РК 75-7-11, в разрыв электрической цепи которого подсоединялся электрически взрываемый тонкий медный провод диаметром $d_k=0,2$ мм и длиной $l_k=100$ мм. Для осуществления явления ЭВ данной медной проволочки нами был применен генератор импульс-

ных токов (ГИТ-А), являющийся составной частью генератора ГТМ и предназначенный для формирования на электрической нагрузке импульсной А- компоненты тока линейной молнии [5]. Общий вид генератора ГИТ-А и его рабочего стола приведен на рис. 2.

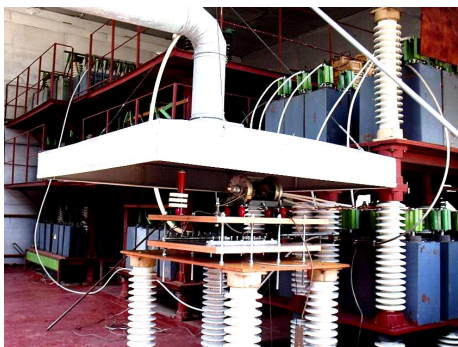


Рис. 2. Внешний вид мощного генератора ГИТ-А на запасаемую номинальную электрическую энергию в 420 кДж (на переднем плане находится рабочий стол с трехэлектродным воздушным коммутатором K_1 и системой воздушной вытяжки, а на заднем плане справа – генератор ГИТ-А для получения импульсной А- компоненты тока искусственной молнии или импульсного тока иной формы) [5]

На рис. 3 в упрощенном виде приведена принципиальная электрическая схема используемого в проводимых нами в лабораторных условиях на открытом воздухе высоковольтных электровзрывных опытах общим числом до 20 шт. мощного генератора ГИТ-А.

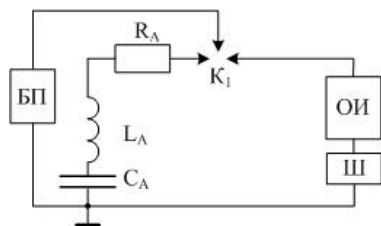


Рис. 3. Электрическая схема разрядной цепи мощного высоковольтного генератора ГИТ-А для получения при помощи подводного ЭВ тонких медных провололок мелкодисперсных проводниковых материалов (БП – высоковольтный блок электрического поджига воздушного трехэлектродного коммутатора K_1 , формирующий микросекундный импульс напряжения амплитудой до ± 100 кВ; ОИ – объект испытаний в виде электрически взрывающегося в технологической камере РК с технической водой тонкого металлического проводника; Ш – измерительный шунт типа ШК-300 [5, 6])

В соответствии со схемой рис. 3 собственные электрические параметры генератора ГИТ-А имели следующие численные значения [5]: емкость $C_A=333$ мкФ; индуктивность $L_A=2,5$ мкГн; активное сопротивление $R_A=0,057$ Ом. Измерительный шунт ШК-300 характеризовался собственным активным сопротивлением 0,185 мОм и коэффициентом преобразования, равным около 11261 А/В [5,6]. Для регистрации полезного электрического сигнала с шунта ШК-300 были использованы триаксиальная кабельная линия связи длиной до 60 м и цифровой запоминающий осциллограф типа Tektronix TDS 1012, размещенный в заглубленном экранированном измерительном бункере.

На рис. 4 показана изоляционная технологическая камера РК с электрически взрывающимся в ее технической воде тонким медным проводом, подключенным в зоне рабочего стола ГТМ к силовоточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А.



Рис. 4. Внешний вид элементов рабочего стола, силовоточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А и технологической камеры РК с электрически взрывающимся в ее технической воде тонким медным проводом диаметром $d_k=0,2$ мм и длиной $l_k=100$ мм (изоляция тонкостенная камера РК объемом 1,5 л для исключения разрушения ее стенки при подводном электровзрыве в ней провода дополнительно размещена в открытой металлической толстостенной емкости с технической водой объемом до 15 л)

Требуется с помощью указанных выше мощного стационарного высоковольтного электрофизического оборудования, тонких медных проводов и лабораторного образца технологической камеры РК с технической водой опытным путем исследовать возможности ЭВП-технологии получения дисперсных материалов.

2. ОПЫТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОДВОДНОМ ЭВ ТОНКИХ МЕДНЫХ ПРОВОДОВ

Первоначально остановимся на амплитудно-временных параметрах (АВП) импульсного тока $i_A(t)$, протекающего в силовоточной разрядной цепи генератора ГИТ-А с номинальным зарядным напряжением $U_{3A}=\pm 50$ кВ его импульсных конденсаторов типа ИК-50-3 как до подводного ЭВ тонких медных провололок в технологической камере РК, так и в его быстропротекающем процессе. На рис. 5 приведена осциллограмма данного разрядного тока для случая, когда в камере РК с водой вместо исследуемой тонкой медной провололки был установлен массивный медный токопровод диаметром $d_0=2$ мм и длиной $l_0=100$ мм, шунтирующий соответствующий разрядный промежуток вдоль круглой полиэтиленовой изоляции в зоне концевой разделки кабеля марки РК 75-7-11. Зарядное напряжение U_{3A} отрицательной полярности конденсаторов генератора ГИТ-А при этом составляло величину, примерно равную 7 кВ. Из данных рис. 5 следует, что в этом случае первая амплитуда затухающего синусоидального тока в цепи генератора ГИТ-А численно составляет при $t_{mA}=45$ мкс около $I_{mA}=-4,44$ В \times 11261 А/В $=-50$ кА. Максимальное значение второй положительной полуволны тока проводимости в массивном медном токопроводе равно примерно 17,1 кА, а третьей отрицательной полуволны тока – 3,6 кА.

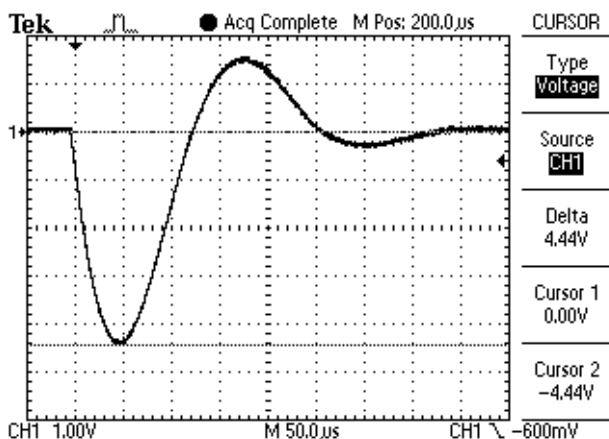


Рис. 5. Осциллограмма импульсного тока в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А (в технологической камере РК с технической водой вместо тонкого медного провода диаметром $d_k=0,2$ мм и длиной $l_k=100$ мм установлен шунтирующий массивный медный токопровод диаметром $d_0=2$ мм и длиной $l_0=100$ мм; $U_{3A}=-7$ кВ; $I_{mA}=-50$ кА; $\delta_{mA}=15,91 \cdot 10^9$ А/м²; масштаб по вертикали – 11,26 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

Согласно данным рис. 5 период колебаний импульсного тока в разрядной цепи генератора ГИТ-А был равен примерно $T_A=252$ мкс. При емкости $C_A=333$ мкФ конденсаторной батареи генератора ГИТ-А это значение T_A обуславливает величину полной индуктивности разрядной цепи генератора ГИТ-А в 4,83 мкГн. Так как согласно рис. 5 логарифмический декремент колебаний Δ_A импульсного тока в цепи разряда генератора ГИТ-А составляет величину 2,63, то из равенства $\Delta_A=\delta_A \cdot T_A$ при указанном значении T_A получаем, что в рассматриваемом случае коэффициент затухания δ_A импульсного тока оказывается равным около $10,44 \cdot 10^3$ с⁻¹. Поэтому в этом случае величина полного активного сопротивления в сильноточной разрядной цепи генератора ГИТ-А со всеми токопроводящими элементами, включая и шунтирующий медный токопровод диаметром $d_0=2$ мм и длиной $l_0=100$ мм технологической изоляционной камеры РК, будет составлять значение, равное примерно 100,8 мОм. На рис. 6 приведена осциллограмма импульсного тока в разрядной цепи генератора ГИТ-А при осуществлении в выбранной нами изоляционной РК подводного ЭВ тонкого медного провода диаметром $d_k=0,2$ мм и длиной $l_k=100$ мм. Из данных рис. 6 видно, что при рассматриваемом ЭВ исследуемого медного провода импульсный ток из колебательного режима (см. рис. 5) переходит в критический режим, приближающийся к аperiодическому. Амплитуда импульсного тока, протекающего через электрически взрывающийся тонкий медный провод, численно составляет при этом значение, примерно равное $I_{mA}=-3,52$ В \times 11261 А/В $=-39,64$ кА ($t_{mA}=43$ мкс). Максимальное значение модуля плотности δ_{mA} импульсного тока в тонком медном проводе теоретически может достигать численного показателя, примерно равного $\delta_{mA}=I_{mA}/S_{np}=12,62 \cdot 10^{11}$ А/м², где $S_{np}=3,14 \cdot 10^{-8}$ м² – величина поперечного сечения электрически взрывающегося в воде РК тонкого медного провода. Видно,

что плотность δ_{mA} импульсного тока проводимости в исследуемом медном проводе гипотетически может принимать значение, соответствующее согласно [1] быстрому ЭВ металлического проводника. Из-за того, что ЭВ исследуемой тонкой медной проволоочки практически происходит на нарастающей части первой полуволны разрядного тока в цепи генератора ГИТ-А (примерно при времени $t_B=3,2$ мкс и токе $i_A(t_B)=11$ кА), то реальная плотность δ_{mA} импульсного тока в ней достигает около $3,5 \cdot 10^{11}$ А/м². Эта величина δ_{mA} в тонкой медной проволоочке также соответствует указанному выше режиму ее быстрого ЭВ [1].

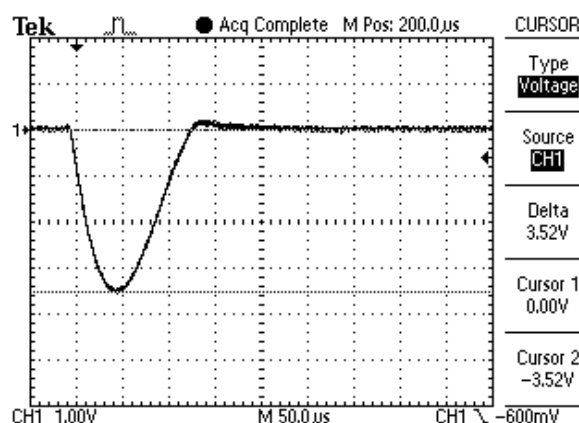


Рис. 6. Осциллограмма импульсного тока в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А при подводном ЭВ в камере РК с водой тонкого медного провода диаметром $d_k=0,2$ мм и длиной $l_k=100$ мм ($U_{3A}=-7$ кВ; $I_{mA}=-39,64$ кА; $\delta_{mA}=3,5 \cdot 10^{11}$ А/м²; масштаб по вертикали – 11,26 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

Далее остановимся на результатах микроскопического исследования неорганических продуктов, образовавшихся в технической воде используемой нами технологической камеры РК от подводного ЭВ в ней тонких медных проволоочек ($d_k=0,2$ мм; $l_k=100$ мм) при АВП разрядного тока $i_A(t)$ генератора ГИТ-А, соответствующих данным рис. 6. Укажем, что подобные исследования взвешенных в технической воде камеры РК мелкодисперсных проводниковых фракций от ЭВ в ней выбранных тонких медных проволоочек проводились на оптическом микроскопе типа МБС-9 (с окуляром 8X и сменной измерительной шкалой), люминесцентном микроскопе типа Люмам-МП-4 и просвечивающем электронном микроскопе типа ПЭМ-145К. При этом на их столе наблюдений исследовались капельные порции воды из технологической камеры РК, взятые после осуществления в ней одного подводного ЭВ и последующего механического перемешивания (взбалтывания) ее содержимого.

На рис. 7 приведен общий вид скопления округлых микронных и субмикронных неорганических частиц, образовавшихся при подводном ЭВ медного провода ($d_k=0,2$ мм; $l_k=100$ мм) в электродинамическом режиме, когда $I_{mA}=-39,64$ кА и $\delta_{mA}=3,5 \cdot 10^{11}$ А/м². Из данных рис. 7 видно, что линейные размеры этих частиц составляют от 10 до 1 мкм. Характерной особенностью для данных микрочастиц является наличие вокруг них внешних оксидных оболочек, вероятно

образующихся при резком охлаждении в воде радиально разлетающихся при ЭВ микрострат меди от сублимируемого (испаряющегося) вещества провода.

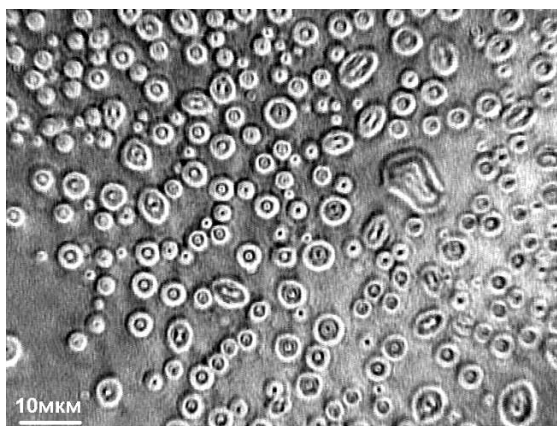


Рис. 7. Массив округлых микронных и субмикронных неорганических образований твердого вещества при подводном ЭВ в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А тонкого медного провода ($d_k=0,2$ мм; $l_k=100$ мм; $U_{3A}=-7$ кВ; $I_{mA}=-39,64$ кА; $\delta_{mA}=3,5 \cdot 10^{11}$ А/м²; линейный масштаб – 10 мкм/метка)

Расчетная оценка усредненных линейных размеров возможных микрострат меди при ЭВ исследуемых тонких проволочек, выполненная по квантовомеханической формуле (2.26) из [7], характерной для усредненной ширины волновых электронных пакетов в этих проволочках, показывает, что при $\delta_{mA}=3,5 \cdot 10^{11}$ А/м² данные размеры могут приблизительно характеризоваться величиной в 4,5 мкм. В этой связи квантовомеханический подход, представленный автором в [7] для описания процесса распределения тока проводимости в металлических проводниках, может в первом приближении использоваться и при нахождении размеров крупнодисперсных частиц при ЭВ проводов.

На рис. 8 представлены отдельные округлые наноструктурные неорганические частицы, также присутствующие в исследуемой под микроскопом микрокапле воды, взятой из технологической камеры РК после осуществления в ней одного подводного ЭВ медного провода ($d_k=0,2$ мм; $l_k=100$ мм; $I_{mA}=-39,64$ кА; $\delta_{mA}=3,5 \cdot 10^{11}$ А/м²). Из данных рис. 8 следует, что эти округлые наночастицы имеют диаметр 100 нм и менее. Согласно принятой классификации в нанотехнологии рассматриваемые ультрадисперсные частицы вещества относятся к наноматериалам 1-го рода [8].

Из области бурно развивающейся сейчас во всем мире нанотехнологии известно, что именно с геометрического размера конденсированной фазы вещества менее 100 нм и начинают резко проявляться размерные эффекты для наноматериалов 1-го рода [8]. На рис. 9 показано скопление округлых наноструктурных неорганических частиц диаметром до 10 нм, выявленных в исследуемых микродозах воды из технологической камеры РК с продуктами электровзрыва в ней меди при меньшем, чем на рис. 8 линейном масштабе.

На рис. 10 приведены отдельные округлые наноструктурные неорганические частицы диаметром от 30 до 10 нм (при линейном масштабе в 20 нм на метку), присутствующие в кластерах малых доз техниче-

ской воды, взятой из технологической камеры РК после протекания в ней явления одиночного подводного ЭВ исследуемой тонкой медной проволочки в разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А ($d_k=0,2$ мм; $l_k=100$ мм; $I_{mA}=-39,64$ кА; $\delta_{mA}=3,5 \cdot 10^{11}$ А/м²).

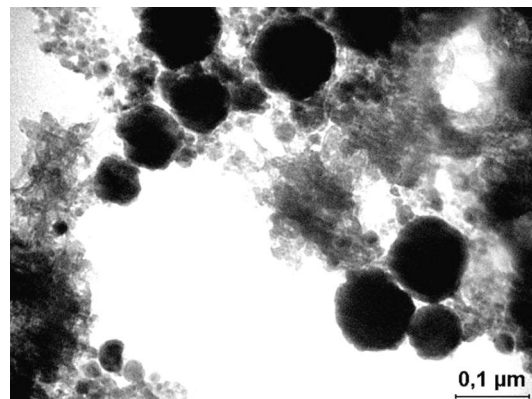


Рис. 8. Отдельные из фрактального кластера округлые наноструктурные неорганические образования твердого вещества при подводном ЭВ в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А тонкого медного провода ($d_k=0,2$ мм; $l_k=100$ мм; $U_{3A}=-7$ кВ; $I_{mA}=-39,64$ кА; $\delta_{mA}=3,5 \cdot 10^{11}$ А/м²; линейный масштаб – 100 нм/метка)

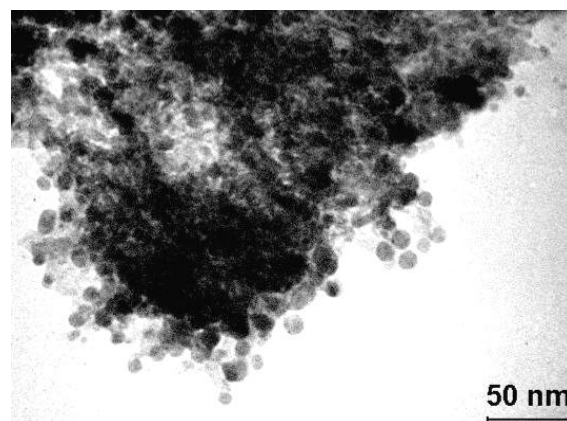


Рис. 9. Массив округлых наноструктурных неорганических образований твердого вещества (фрактальный кластер) при подводном ЭВ в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А тонкого медного провода ($d_k=0,2$ мм; $l_k=100$ мм; $U_{3A}=-7$ кВ; $I_{mA}=-39,64$ кА; $\delta_{mA}=3,5 \cdot 10^{11}$ А/м²; линейный масштаб – 50 нм/метка)

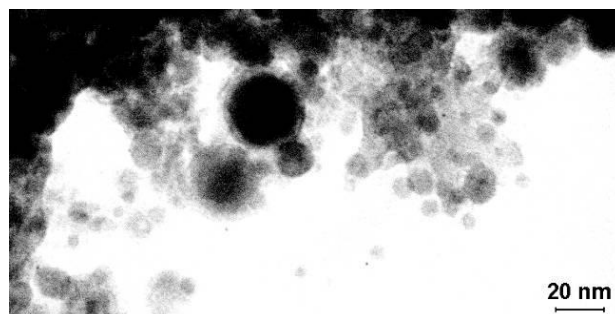


Рис. 10. Отдельные из фрактального кластера округлые наноструктурные неорганические образования твердого вещества при подводном ЭВ в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А тонкого медного провода ($d_k=0,2$ мм; $l_k=100$ мм; $U_{3A}=-7$ кВ; $I_{mA}=-39,64$ кА; $\delta_{mA}=3,5 \cdot 10^{11}$ А/м²; линейный масштаб – 20 нм/метка)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально установлено, что при подводном электровзрыве тонких круглых медных проволочек диаметром $d_k=0,2$ мм и длиной $l_k=100$ мм в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора ГИТ-А ($U_{3A}=7$ кВ; $I_{mA}=-39,64$ кА; $\delta_{mA}=3,5 \cdot 10^{11}$ А/м²) в технической воде технологической камеры РК со взрывающимся проводом образуется высокодисперсный материал, содержащий широкий размерный спектр округлых неорганических частиц вещества диаметром от 10 мкм до 10 нм.

2. Результаты проведенных исследований могут иметь определенные электротехнологические перспективы при лабораторном (промышленном) получении дисперсных проводящих материалов с микронными, субмикронными и наноструктурными частями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии / Под ред. В.Н. Карнышина. – Минск: Наука и техника, 1983. – 151 с.
2. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – Киев: Наукова думка, 1990. – 208 с.
3. Лернер М.И. Электровзрывные нанопорошки неорганических материалов: технология производства, характеристики, области применения. Автореферат дис. ... докт. техн. наук (01.04.07). – Томск (Россия), 2007. – 31 с.
4. Григорьев А.Н. Исследование электрического взрыва проводников как источника импульсного давления. Автореферат дис. ... канд. техн. наук (05.14.12). – Томск (Россия), 2011. – 22 с.
5. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И. и др. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81-85.
6. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Лысенко В.О. Экспериментальная оценка основных электрических характеристик сильноточного плазменного канала подводного искрового разряда в цепи высоковольтного генератора импульсной компоненты тока искусственной молнии // Электротехника и электромеханика. – 2011. – № 6. – С. 59-63.
7. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2009. – 384 с.
8. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. – Харьков: Изд-во "НТМТ", 2011. – 311 с.

Bibliography (transliterated): 1. Stolovich N.N. `Elektrovzryvnye preobrazovateli `energii / Pod red. V.N. Karnyushina. – Minsk: Nauka i tehnika, 1983. – 151 s. 2. Gulij G.A. Nauchnye osnovy razryadno-impul'snyh tehnologij. – Kiev: Naukova dumka, 1990. – 208 s. 3. Lerner M.I. `Elektrovzryvnye nanoporoshki neorganicheskikh materialov: tehnologiya proizvodstva, harakteristiki, oblasti primeneniya. Avtoreferat dis. ... dokt. tehn. nauk (01.04.07). – Tomsk (Rossiya), 2007. – 31 s. 4. Grigor'ev A.N. Issledovanie `elektricheskogo vzryva provodnikov kak istochnika impul'snogo davleniya. Avtoreferat dis. ... kand. tehn. nauk (05.14.12). – Tomsk (Rossiya), 2011. – 22 s. 5. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I. i dr. Generator toka iskusstvennoj molnii dlya naturalnykh ispytaniy tehniceskikh ob`ektov // Pribory i tehnika `eksperimenta. – 2008. – № 3. – S. 81-85. 6. Baranov M.I., Koliushko G.M., Lysenko V.O. `Eksperimental'naya ocenka osnovnykh `elektricheskikh harakteristik sil'notochnogo plazmennogo kanala podvodnogo iskrovogo razryada v cepi vysokovol'nogo generatora impul'snoy komponenty toka iskusstvennoj molnii // Elektrotehnika i elektromehaniка. – 2011. – № 6. – S. 59-63. 7. Baranov M.I. Izbrannye voprosy `elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teoriya `elektrofizicheskikh `effektov i zadach. – Har'kov: Izd-vo NTU "HPI", 2009. – 384 s. 8. Baranov M.I. Antologiya vydayushchihся dostizhenij v nauke i tehnike: Monografiya v 2-h tomah. Tom 1. – Har'kov: Izd-vo "NTMT", 2011. – 311 s.

Поступила 28.02.2012

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.
НИПКИ "Молния"
Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт"
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47
тел. (057) 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Baranov M.I.

Preparation of disperse materials with micron, submicron and nanostructured matter particles under electric explosion of thin metallic conductors.

Results of experimental research into formation of micron, submicron and nanostructured conductive products through electric explosion of thin copper wires in a technological chamber with process water are presented. It is shown that linear size of such fine-dispersed materials at maximum pulse conduction current density in the copper wires under 350 kA/mm² lies in the range of 10 nm through 10 μm.

Key words – large pulse current, electric explosion, metallic conductor, fine-dispersed materials.