

НАНЕСЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ

В.Ю. Бакларь, А.Ю. Терехов, Н.И. Кускова

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

Уникальные электрические, магнитные оптические и прочностные свойства такого углеродного материала (УНМ), как углеродные нанотрубки (УНТ), показали возможности его широкого применения для решения задач электроники, материаловедения и других областей техники. Большинство способов получения УНТ основано на конденсации углерода, происходящей на подложке с нанесенным слоем катализатора. Применение в качестве катализаторов таких металлов, как Fe, Ni, Co, способствует получению одностеночных УНТ [1]. Так, например, при синтезе углеродных нанотрубок методом химического осаждения из пара и использовании катализатора (слой железа), нанесенного на подложку методом электроразрядного напыления, достигается непрерывный синтез вертикально ориентированных УНТ различной высоты, при этом чем больше поверхностная плотность частиц катализатора, тем больше высота и скорость роста УНТ. Электрический взрыв проводников (ЭВП) позволяет получать ультрадисперсные порошки металлов и УНМ, а также наносить покрытия из этих материалов на поверхности любой конфигурации. В связи с этим возникает возможность комплексного использования метода ЭВП как для синтеза наноматериалов, так и для их нанесения на различные подложки с целью дальнейшего использования в качестве катализаторов для повышения выхода и качества УНТ.

По сложившимся [2, 3] представлениям частицы при электрическом взрыве (ЭВ) могут образовываться двумя путями: непосредственно из жидкой фазы и в процессе конденсации разлетающегося пара. Размеры частиц, образовавшихся в результате действия этих двух механизмов, подчиняются существенно различающимся распределениям: образуются «остаточные» капли с характерным размером 1 мкм и частицы с размером порядка сотен ангстрем. Результаты моделирования [4, 5] эволюции частиц в процессе разлета продуктов электрического взрыва показали, что при равенстве удельной вводимой энергии ω и удельной энергии сублимации вещества ω_c первоначально присутствующие «остаточные» частицы при разлете сохраняют свой размер. Напротив, при $\omega = 2\omega_c$ практически весь металл испаряется. Вариант $\omega = 1,5\omega_c$ имеет промежуточный характер. Исходя из рассмотренных данных можно сделать вывод, что при $\omega < \omega_c$ в продуктах взрыва преобладают частицы, образующиеся из капель; при $\omega \geq \omega_c$ доминируют частицы, образующиеся при конденсации из паров разлетающегося вещества. Соответствующим образом в зависимости от энергии может изменяться размер частиц, а следовательно, и характер покрытия.

Цель данной работы – исследование влияния энергетических характеристик электрического взрыва металлических проводников на структуру и устойчивость полученного покрытия.

Методика эксперимента

Для проведения эксперимента был создан экспериментальный стенд (рис. 1), позволяющий генерировать электрические импульсы заданных параметров. В состав стенда входит автотрансформатор АОМН-40-220-75, обеспечивающий плавную регулировку напряжения первичной обмотки трансформатора-выпрямителя ОМТВ-5/50, с выходного выпрямителя которого через зарядное сопротивление осуществлялась зарядка емкостного накопителя энергии. В качестве последнего использованы конденсаторы типа ИК50-3. Коммутатором служил управляемый воздушный шаровой разрядник, на который с блока поджига подавался импульс высокого напряжения. Блок поджига БП запускался прямоугольным импульсом с выхода генератора Г5-63. Одновременно с генератора подавался синхроимпульс на вход синхронизации запоминающего осциллографа С8-17.

Электроразрядная камера имела следующую конструкцию. В прямоугольном корпусе, изготовленном из оргстекла, находилась электродная система, состоящая из двух электродов цилиндрической формы диаметром 16 мм. Электроды на торцевой части имели подпружиненные зажимы для улучшения контакта и простоты эксплуатации, а резьбовое крепление на стенке камеры позволяло регулировать разрядный промежуток. На одном из электродов крепился полый цилиндр ($d = 16$ мм и толщина стенки – 10 мм) с прорезью на торце ($d_2 = 27$ мм), в которую помещалась подложка – прямоугольная сетка, свернутая в цилиндр. Таким образом, достигались одинаковые условия для нанесения покрытия по всей площади подложки.

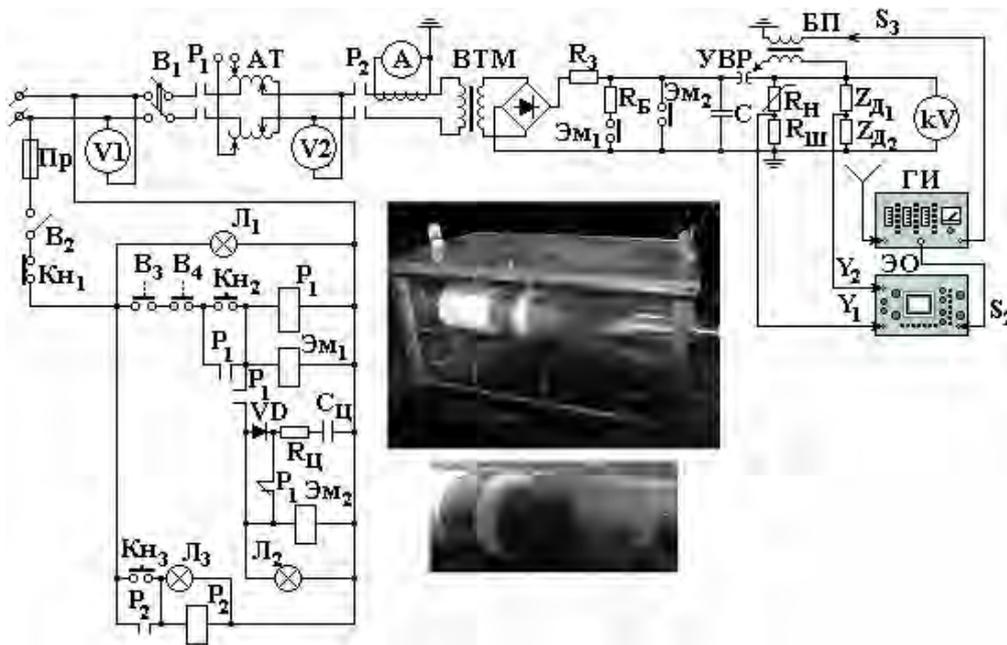


Рис. 1. Электрическая схема экспериментального стенда и общий вид электроразрядной камеры

Результаты эксперимента и их анализ

В качестве подложки использовалась латунная сетка толщиной 0,1 мм и размером ячейки 1x1 мм, свернутая в полый цилиндр. Проводником служила никелевая проволока круглого сечения диаметром 0,3 мм. Электрический взрыв проводников происходил в воздухе. Изменяли вводимую удельную энергию и расстояние от центра проводника до поверхности сетки. Первоначально было решено реализовать «согласованный» режим ЭВ, так как в данном случае наблюдается наиболее быстрое выделение энергии в канале разряда, параметры для реализации данного режима рассчитывались согласно [6].

В первом случае сетку сворачивали в цилиндр с внутренним диаметром 27 мм, сверху первой сетки помещали вторую для уменьшения пропускаемой способности поверхности нанесения. Проводник длиной 140 мм имел форму спирали для приближения канала разряда к поверхности сетки. Начальное напряжение равнялось 15 кВ, емкость накопительной батареи – 3 мкФ. Взрыв проводника происходил при «согласованном» режиме – $\omega = \omega_c$. Кривые тока и напряжения, характерные для данного режима ЭВ проводника, приведены на рис. 2. На первой стадии было взорвано 50 проводников, прибавка массы составила 220 мг для внутренней сетки и 180 мг – для внешней. Затем поверх внешней сетки накрутили фольгу из константана, в этом случае прибавка массы составила 430 мг на внутренней сетке и 30 мг на внешней. Фотографии поверхности покрытия, наносимого при данном режиме, получены с помощью оптического микроскопа «Микротех ММО 1600» при увеличении x100 и x400 (рис. 3, а, б). Как видно из рисунков, поверхность имеет неоднородную пористую структуру, образованную остывшими крупными каплями металла, при этом покрытие достаточно неустойчиво.

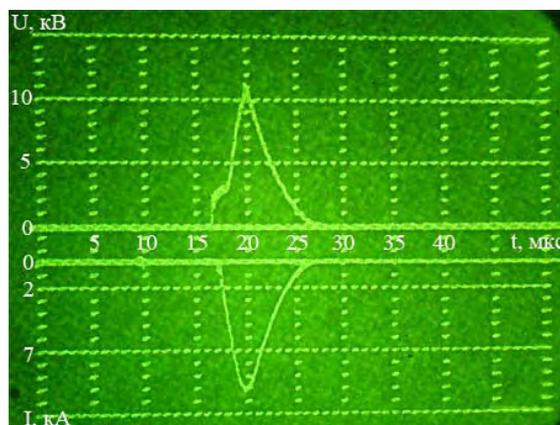


Рис. 2. Характерная осциллограмма взрыва никелевого проводника. $U_0 = 15$ кВ, $C = 3$ мкФ, $d = 0,3$ мм, $l = 140$ мм

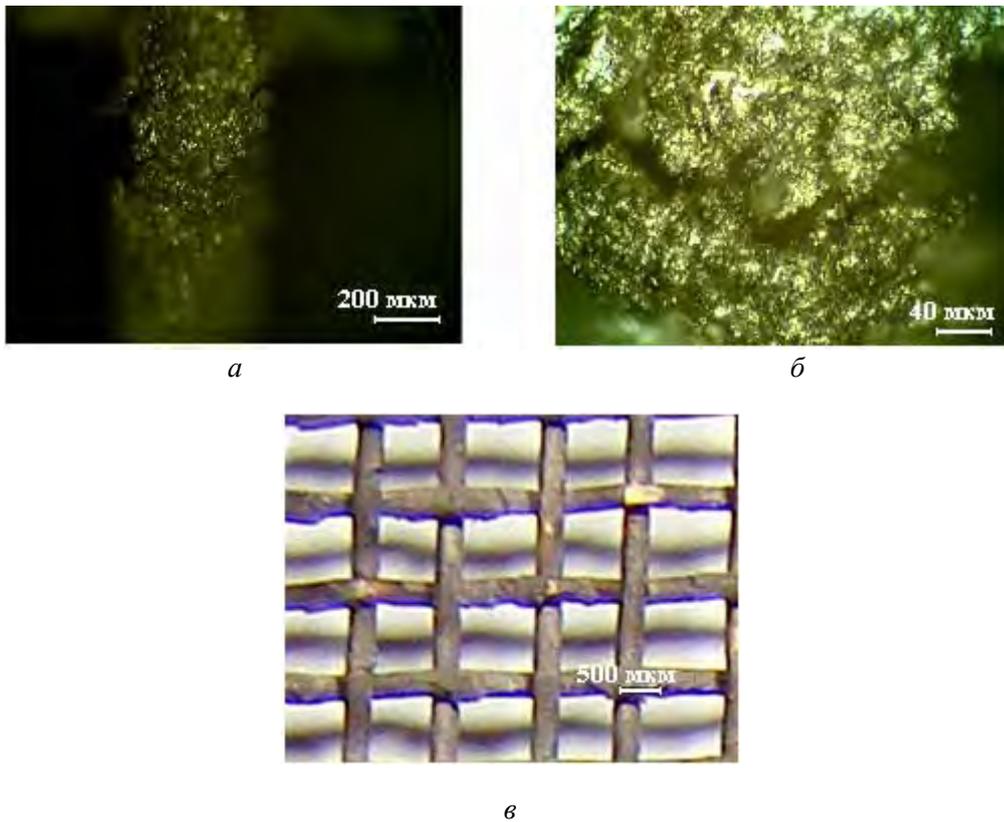


Рис. 3. Изображение покрытия, полученного при $\omega = \omega_c$, на расстоянии 13,5 мм от взрываемого проводника. Увеличение: $\times 100$ (а), $\times 400$ (б), $\times 12$ (в)

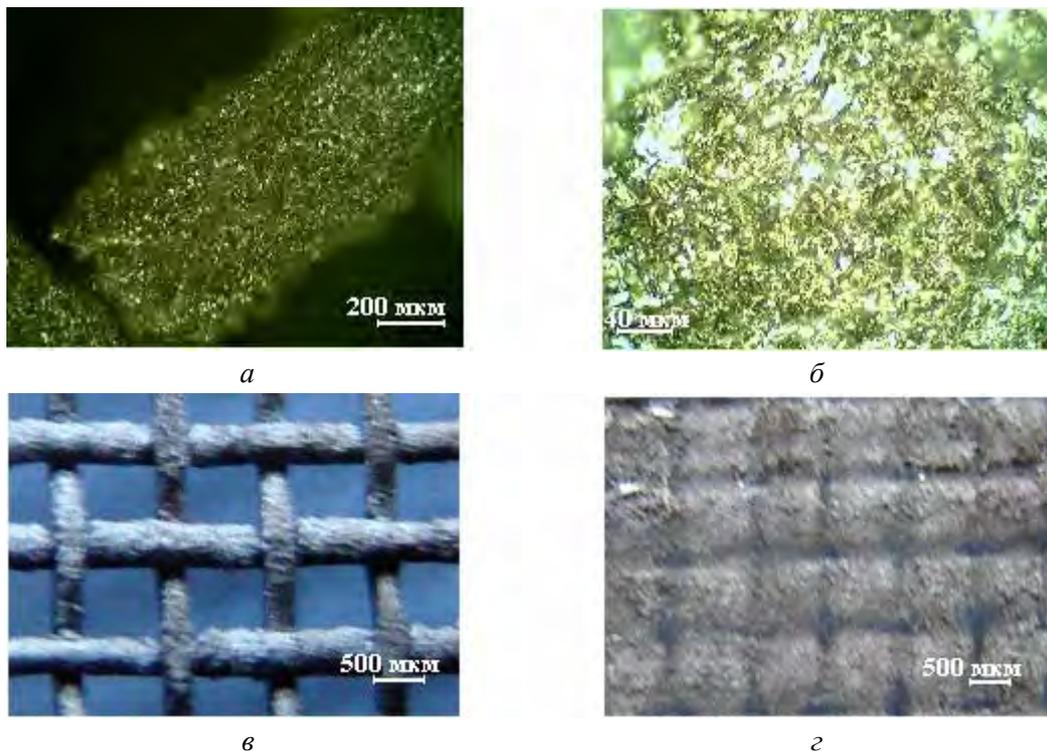


Рис. 4. Изображение покрытия, полученного при $\omega = \omega_c$, на расстоянии 5,5 мм от взрываемого проводника. Увеличение: $\times 100$ (а); $\times 400$ (б); $\times 12$ (в, г)

Во втором случае сетку сворачивали с внутренним диаметром 11 мм, что позволило еще больше приблизить поверхность нанесения к каналу разряда, удельная вводимая энергия равнялась энергии сублимации никеля. Для уменьшения зоны разлета частиц взрываемого проводника было решено поместить сетку в цилиндр из фольги. Длина проводника составляла 140 мм, как и первом случае. Начальное напряжение составляло 15 кВ, емкость накопительной батареи – 3 мкФ. Взрыв проводника

происходил при согласованном режиме. После взрыва 50 проводников прибавка массы на сетке составила 1200 мг, на фольге – 620 мг.

Поверхность наносимого покрытия носит более равномерный характер по сравнению с предыдущим (рис. 4,а,б), но покрытие также неустойчиво к внешнему воздействию. При этом на поверхности фольги тоже образовался слой никеля (рис. 4,з), имеющий пористую крупнозернистую структуру в виде квадратных ячеек. Покрытие на фольге оказалось более устойчивым, чем на поверхности сетки.

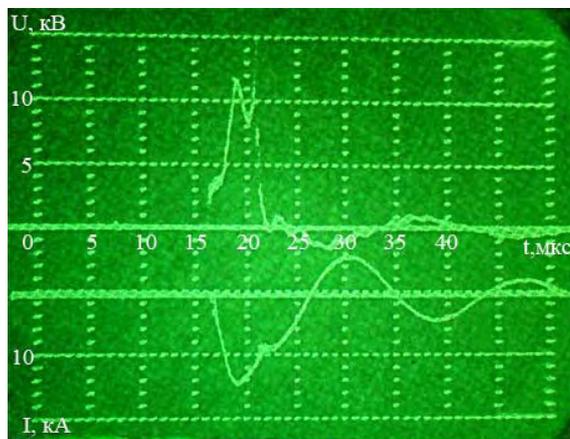


Рис. 5. Характерная осциллограмма взрыва никелевого проводника. $U_0 = 18$ кВ, $C = 3$ мкФ, $d = 0,3$ мм, $l = 98$ мм

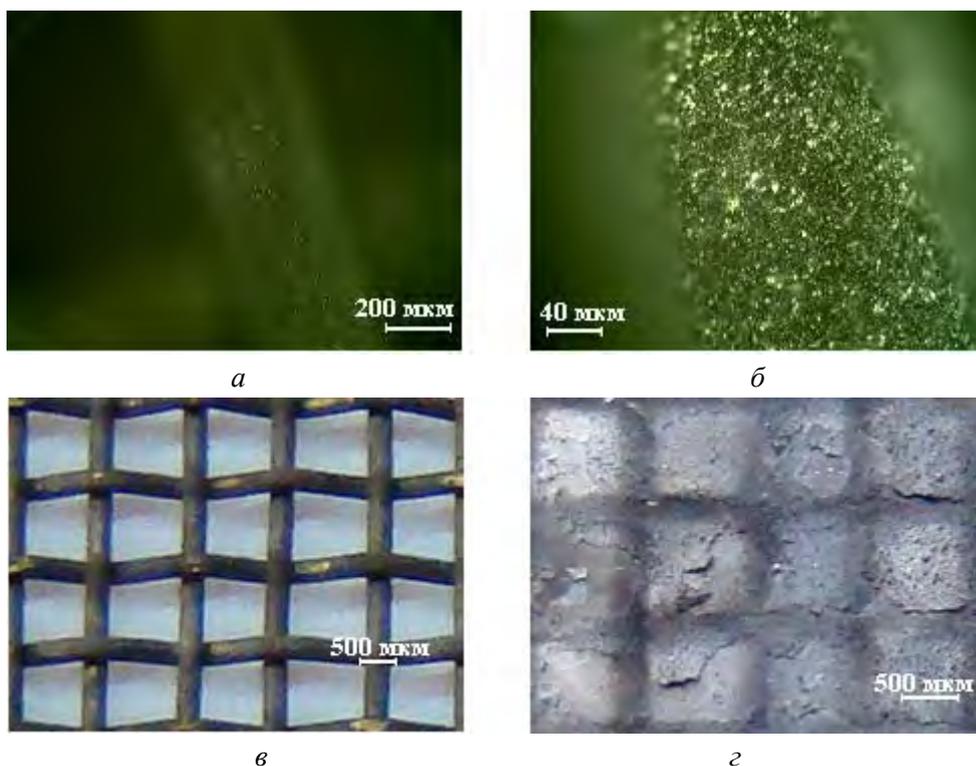


Рис. 6. Изображение покрытия, полученного при $\omega = 2\omega_0$, на расстоянии 13,5 мм от взрываемого проводника. Увеличение: $\times 100$ (а), $\times 400$ (б), $\times 12$ (в), $\times 20$ (г)

В третьем случае удельную вводимую энергию увеличили вдвое, при этом сетку сворачивали в цилиндр с внутренним диаметром 27 мм и помещали в цилиндр из фольги. Длина проводника (прямого) составляла 98 мм. Начальное напряжение – 18 кВ, емкость – 3 мкФ. Взрыв проводника происходил при колебательном режиме. Кривые тока и напряжения, характерные для данного режима ЭВ проводника, приведены на рис. 5. После взрыва 50 проводников прибавка массы на сетке составила 130 мг, на фольге – 270 мг. Как видно по фотографиям с оптического микроскопа (рис. 6), поверхность покрытия имеет мелкозернистый слой никеля, то есть продукты ЭВ состоят из частиц, образующихся при конденсации из паров разлетающегося вещества. При этом данное покрытие оказалось более устойчивым к механическим повреждениям, чем образованное из крупных капель металла. В свою очередь слой металла, осевший на поверхность фольги (рис. 6,г), по внешнему виду напоминал

чешуйчатую пленку и при механическом воздействии достаточно легко удалялся с поверхности фольги. Различия как для этого, так и для предыдущего случаев в прочностных характеристиках наносимого металлического слоя между покрытиями на поверхности латунной сетки и на поверхности константановой фольги изучены не были.

В четвертом случае сетку сворачивали в цилиндр с внутренним диаметром 11 мм. Длина проводника, начальное напряжение, емкость оставались такими же, как и в предыдущем эксперименте. Взрыв проводника происходил при колебательном режиме. Сетка также помещалась в цилиндр из фольги. После взрыва 50 проводников прибавка массы на сетке составила 400 мг. Характер нанесенного покрытия (рис. 7) такой же, как и в предыдущем случае, но при этом его толщина заметно больше, что связано с меньшим расстоянием от взрываемого проводника.

Вес и толщина покрытия, полученного при электровзрыве в случае $\omega = \omega_c$, значительно больше, чем полученного при $\omega = 2\omega_c$, что связано с большими размерами разлетающихся частиц, которые не позволяют им пролететь через ячейки сетки.

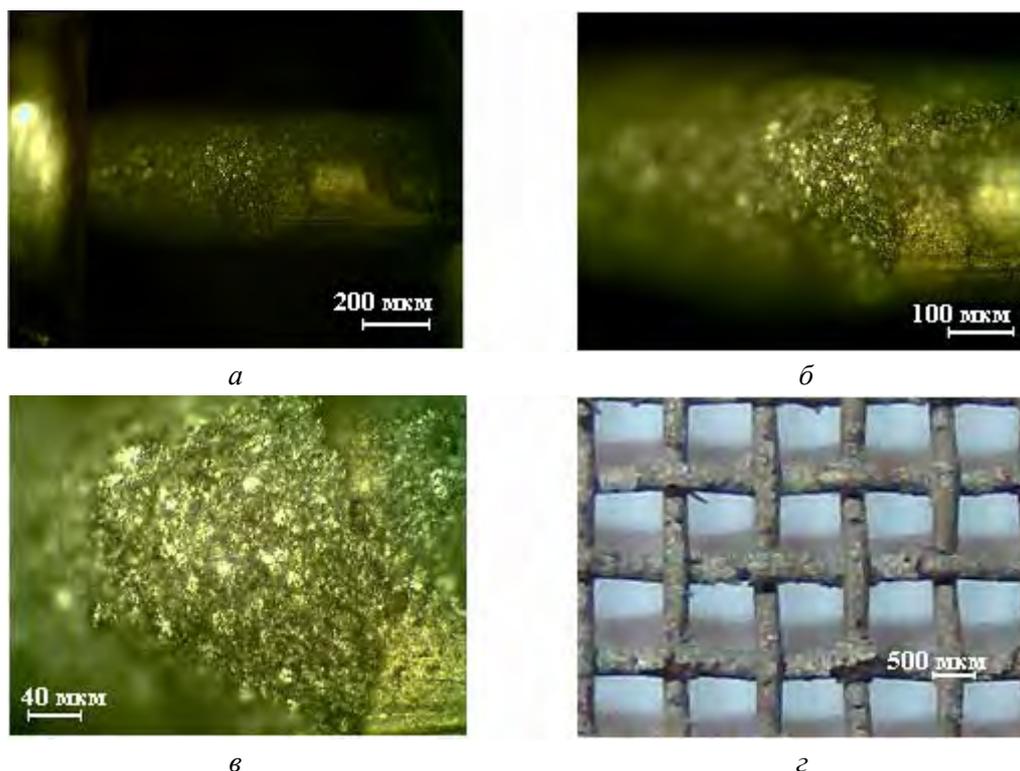


Рис. 7. Изображение покрытия, полученного при $\omega = 2\omega_c$, на расстоянии 5,5 мм от взрываемого проводника. Увеличение: $\times 100$ (а), $\times 200$ (б), $\times 400$ (в), $\times 12$ (г)

Заключение

Нанесенное электровзрывным методом на латунную сетку при $U_0 = 15$ кВ, $\omega = \omega_c$ никелевое покрытие, состоящее из хаотически расположенных застывших капель металла, является неустойчивым.

Для получения УНТ можно применять покрытие, образованное мелкодисперсными частицами никеля, осажденными из газовой фазы в процессе высокоэнергетических режимов электровзрыва проводников ($U_0 = 18$ кВ, $\omega = 2\omega_c$). Нанесенное покрытие однородно и устойчиво к механическим воздействиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Осипова И.В., Внукова Н.Г., Глущенко Г.А., Крылов А.С., Томашевич Е.В., Жарков С.М., Чурилов Г.Н. Никельсодержащие углеродные нанотрубки и наночастицы, полученные в плазме высокочастотной дуги. *Физика твердого тела*. 2009, **51**(9), 1857–1859.
2. Котов Ю.А., Яворовский Н.А. Исследование частиц, образующихся при электрическом взрыве проводников. *Физика и химия обработки материалов*. 1978, (4), 24–28.
3. Глазунов Г.П., Корниенко Л.А., Косик Н.А., Митин Р.В., Шевтусев А.П. Некоторые свойства мелкодисперсных порошков, полученных электрическим взрывом проводников в газе высокого давления. *Вопросы атомной науки и техники. Атомное материаловедение*. 1978, (1), 21–24.

4. Волков В.П., Гаврилов В.Н., Литвинов Е.А. Гидродинамика разлета продуктов ЭВП. Получение тонких пленок и ультрадисперсных порошков. *Теплофизика высоких температур*. 1992, (6), 1203–1208.
5. Гаврилов В.Н. *Динамика разлета продуктов электрического взрыва проводников*. Автореферат дис. канд. физ.-мат. наук. Екатеринбург, 1993.
6. Kuskova N.I., Baklar' V.Yu. and Khainatskii S.A. Obtaining Ultrafine Metal Powders under Electric Explosion of Conductors in Liquid: Part III. The Optimum Mode for Explosion of Conductors in Gases; Comparison with Explosion in Liquid. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009, **45**(5), 382–386.

Поступила 23.03.11

Summary

Experimentally investigated is the influence of the energy response of electric explosion of metallic conductors on the structure and resistance of the substrate coating. It is established that at $\omega = \omega_c$, nickel coating is unstable and consists of the chaotically located hardened drops of metal. The coating formed by the highly dispersed particles of nickel, deposited from a gas phase during the electro-explosion at $\omega = 2\omega_c$ is homogeneous and resistant to mechanical effects.
