

МЕТОД АКТИВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОСТРОВКОВЫХ ПЛЕНОЧНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ПРИ ВАКУУМНОМ СИНТЕЗЕ НАНООБЪЕКТОВ

Д. В. Образцов¹, В. Н. Чернышов¹, В. П. Шелохвостов²

*Кафедра «Уголовное право и прикладная информатика
в юриспруденции» (1); elters@crimeinfo.jesby.tstu.ru;
«Материалы и технология» (2), ФГБОУ ВПО «ТГТУ»*

Ключевые слова: активный технологический контроль; вакуумный синтез нанобъектов; островковый пленочный катализатор; электрофизический контроль структуры островковых пленочных катализаторов и нанобъектов.

Аннотация: Рассмотрен метод активного технологического контроля электрофизических параметров структуры островковых пленочных катализаторов при синтезе нанобъектов. Приведена технологическая схема реализации процесса получения нанобъектов заданных параметров.

Введение

В современном производстве наблюдается тенденция увеличения использования нанобъектов и наноструктурированных покрытий в таких областях, как энергетика, электроника, медицина, химическая и военная промышленность [1, 2]. В связи с возрастающей потребностью нанобъектов и наноструктурированных покрытий прибегают к интенсификации процессов их синтеза, что часто негативно сказывается на качестве конечного продукта. Одним из решений данной проблемы является проведение непрерывного контроля технологических параметров в целях управления процессом синтеза нанобъектов и наноструктурированных покрытий.

Как показывает практика, синтез углеродных нанобъектов, обычно проводят на катализаторах, образующих карбиды (например, никель, железо, кобальт и другие металлы, стоящие до водорода в ряду стандартных электродных потенциалов) и не образующих карбиды (например, медь, серебро, золото, платина и другие металлы, имеющие более положительный потенциал, чем потенциал водорода) [3, 4]. Металлические карбидообразующие катализаторы в основном применяются при синтезе углеродных нанобъектов методом пиролиза углеводородов при температурах порядка 500...900 °С. Следовательно пиролитическим методом невозможно производить синтез нанобъектов на пластмассах, легкоплавких сплавах и других поверхностях, не допускающих нагрева до таких температур. Для этого применим другой способ синтеза нанобъектов – напыление в вакууме [5, 6].

Постановка задачи вакуумного синтеза нанобъектов

Синтез нанобъектов на подложке осуществляется на катализаторах, нанесенных на ее поверхность методами распределения раствора суспензии катализатора с помощью центрифуги, выпариванием раствора катализатора или напыле-

нием в вакууме. Метод вакуумного напыления веществ отличается от других тем, что позволяет получать химически чистые катализаторы с равномерным распределением по поверхности подложки, что в дальнейшем положительно влияет на качество синтезируемых нанобъектов. Однако этот метод технически сложен в настройке, так как является многовариативным и следовательно, используя его, довольно сложно добиться необходимой воспроизводимости процесса синтеза нанобъектов. Как известно, только при использовании атомарно гладких поверхностей возможно добиться минимального разброса в размерных параметрах наноструктурированной пленки. В работе [7] объясняются механизмы формирования островков и причина их стабильности. С помощью анализа с использованием метода силовой туннельной микроскопии выявлено, что центрами зародышеобразования островков являются петлевые дислокации. Также центрами зародышеобразования могут служить дефекты, например, нано- и микрошероховатость на поверхности, которая осталась после шлифовки и полировки, а также искусственно созданные центры роста на поверхности подложки.

Установлено, что процесс синтеза углеродных нанобъектов по планарной технологии идет эффективнее при напылении углерода в вакууме не на сплошную металлическую пленку катализатора, а на пленку, имеющую островковую структуру, что предположительно связано с большим числом центров начала роста [8, 9]. Поэтому при синтезе углеродных нанобъектов в вакууме по планарной технологии предпочтение следует отдать островковой структуре пленки катализатора.

Эксперимент показал, что при синтезе наноструктурных пленок на не атомарно гладких поверхностях намного труднее добиться хорошей воспроизводимости наноструктурированных пленок от партии к партии. В математических моделях практически невозможно учесть изменчивость случайных факторов, влияющих на микрорельеф поверхностей, на которых производится синтез наноструктурированных пленок.

Проведенные исследования показали, что большое влияние на качество, а также число нанобъектов при вакуумном напылении оказывает определение оптимального времени напыления островкового катализатора на поверхности подложки.

Для определения момента прекращения напыления островкового катализатора предложен метод, состоящий в дискретной выемки в заданные интервалы времени из вакуумной камеры контрольных образцов, находящихся рядом с поверхностью подложки, с последующим исследованием структуры поверхности контрольных образцов с помощью электронного микроскопа [10]. Время, необходимое для роста пленки заданной толщины, определялось по математической модели (1) с граничным условием (2):

$$t_{\text{нап}} = h \left[6 \cdot 10^5 \left(\alpha_{\text{к}} \frac{3,16 \cdot 10^{-3} \alpha_{\text{и}} P_{\text{и}}^0 F_{\text{и}} \cos \varphi_{\text{и}} \cos \varphi_{\text{п}}}{(2\pi R T_{\text{и}} M)^{0,5} \pi l^2} - \alpha_{\text{и}} \frac{P_{\text{ж}}^0}{(2\pi R T_{\text{п}} M)^{0,5}} M P_{\text{ТВ}}^{-1} \right)^{-1} \right], \quad (1)$$

где h – требуемая толщина пленки, мкм; $F_{\text{и}}$ – площадь поверхности испарителя, значительно меньшая поверхности подложки, см²; l – расстояние от испарителя до рассматриваемой точки N на поверхности подложки, см; $\varphi_{\text{и}}$ и $\varphi_{\text{п}}$ – углы между нормальными к поверхностям источника и подложки соответственно и прямой, соединяющий источник с точкой N ; $\alpha_{\text{к}}$ и $\alpha_{\text{и}}$ – коэффициенты конденсации

и реиспарения с поверхности подложки соответственно; $T_{и}$ – температура испарителя, К; $T_{п}$ – температура на поверхности подложки, К; M_B – молекулярная масса вещества (испаряемого металла), г/моль; $p_{и}^0$ – давление насыщенного пара испаряемого вещества, Па; $p_{ж}^0$ – плотность жидкой фазы вещества (плотность расплавленного металла), г/см³; $p_{тв}$ – плотность конденсата, г/см³; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

$$L \frac{2,62 \cdot 10^{-2} \pi \sigma_{AB}^2 \left[L(0,37 + \sigma_B)^2 (1 + 10,28 M_B / T_B)^{0,5} \right]^{-1} + \left[1 + T_A M_B / (T_B M_A) \right]^{0,5}}{10^{20} k T_A} \leq 0,05, \quad (2)$$

где L – расстояние от испарителя до основной поверхности подложки, см; T_A , T_B – температуры, определяющие энергию атомов (молекул) пара, К; M_A , M_B – атомная/молекулярная масса компонентов A и B в паровой фазе, а.е.м.; σ_{AB} – характеристическое расстояние между компонентами A и B , нм; σ_B – характеристическое расстояние компонента B , нм; k – постоянная Больцмана, Дж/К.

Для проверки работоспособности предложенного метода и корректности созданной модели проведена серия экспериментов при изменении одного параметра – расстояния от испарителя до поверхности подложки. При этом для расчета скорости роста наноструктурной пленки меди и соответственно времени напыления задавали необходимую толщину медной пленки катализатора и углеродной пленки, равной, например, 50 нм. В эксперименте задавались следующие геометрические параметры резистивного испарителя для меди: ширина – 3 мм, длина – 5 мм, глубина – 2 мм). Применяемый испаритель выполнен из листа молибдена толщиной 0,2 мм. Поскольку до начала процесса напыления меди испаритель прогревается до заданной температуры, равной 1546 К (при данной температуре упругость пара паров меди составляет 1,3 Па), то в математическую модель подставляется именно эта температура. В данных экспериментах углерод испарялся в электрической дуге между двумя графитовыми электродами. Площадь дугового пятна на графитовом электроде 0,02 см². Расстояние от испарителей до поверхности подложки при проведении эксперимента задавалась соответственно 30, 40 и 50 см (верхний диапазон данного ограничения связан с конструктивными особенностями применяемой вакуумной установки УНВ-71, а нижний – с необходимостью получения пленки на подложке с отклонением ее толщины от центра подложки к его краю не более 5 %). Температура нагрева основной поверхности и контрольных образцов задавалась равной 473 К. Расчетные значения скорости роста медной и углеродной пленок представлены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения скорости и времени роста медной и углеродной пленок

Расстояние от испарителя подложки, L , см	Скорость роста наноструктурной пленки, нм/с		Время, необходимое для получения наноструктурной пленки толщиной 50 нм, с	
	медной	углеродной	медной	углеродной
30	0,43	0,15	116	334
40	0,22	0,08	227	625
50	0,14	0,05	357	980

Приведенные эксперименты показали работоспособность предложенного метода и возможность его использования при синтезе наноструктурных пленок и нанобъектов. Однако данный метод имеет следующие недостатки. В разработанной модели расчета скорости роста пленки и времени ее напыления не учитываются такие факторы, как шероховатость и физико-химические свойства материала подложки, физические процессы, происходящие при взаимодействии молекулярного потока испаряемого вещества с поверхностью подложки и т.д. В связи с этим при одном и том же времени напыления могут синтезироваться различные пленочные структуры: от идеально сплошной до островковой или структуры смешанного вида. Кроме того, данный метод является затратным в плане предварительной подготовки и необходимости исследований с использованием дорогостоящей электронной микроскопии и применяется только на стадии разработки и отладки технологии синтеза островковой структуры катализатора и углеродных нанобъектов [11]. С помощью него невозможно производить контроль протекающих процессов синтеза наноструктурных пленок и нанобъектов.

Описание предлагаемого метода

В данной работе для определения границ островковой и сплошной пленок катализатора в методе вакуумного напыления предлагается проведение активного технологического контроля в реальном режиме времени. Метод заключается в измерении электрофизических параметров наноструктурных пленок непосредственно в процессе их синтеза и принятия решений по этим данным о продолжении или окончании процесса напыления. Электрофизические параметры отдель-

но взятого нанобъекта описываются законами квантовой физики. При объединении нанобъектов в конгломераты их квантовые свойства проявляются в виде электрофизических параметров (емкости, сопротивления и др.) коллективно образованной ими структуры, которые могут быть измерены обычными приборами.

Для реализации предлагаемого метода в вакуумную камеру рядом с поверхностью основных подложек устанавливают планарный первичный измерительный преобразователь (ПИП), изготовленный на ситалловой подложке размером 10×15 мм путем вакуумного напыления двух медных контактов (в виде встречно-штыревой конструкции) (рис. 1).

На рисунке 2 представлен фрагмент островковой структуры между полосами встречно-штыревой конструкции и соответственно схема подключения прибора (E7-22 измеритель LCR) для контроля емкости и сопротивления.

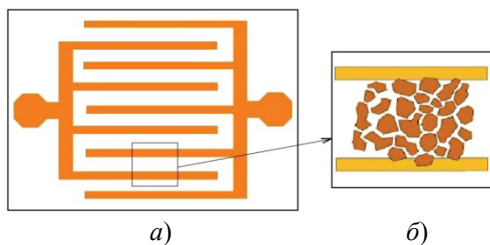


Рис. 1. Планарный первичный измерительный преобразователь:
a – планарный ПИП встречно-штыревой конструкции; *б* – синтезируемая наноструктурная пленка между полосами планарного ПИП

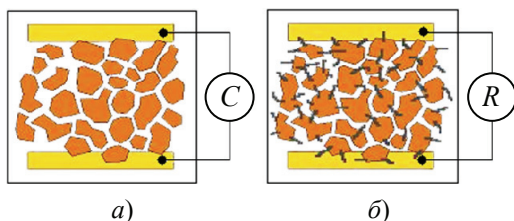


Рис. 2. Структурная схема подключения измерительной аппаратуры к планарному ПИП:
a – при напылении меди (островкового катализатора);
б – при напылении углерода (синтезе углеродных нанобъектов)

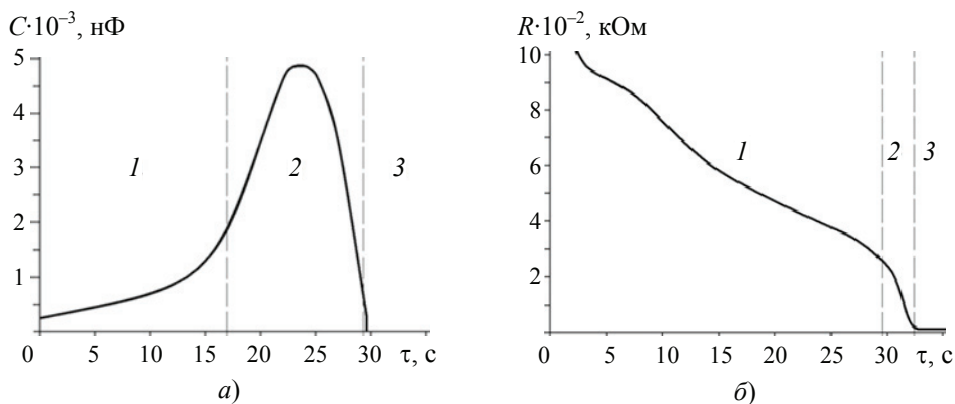


Рис. 3. Экспериментальные графики зависимости емкости (а) и сопротивления (б) между контактами планарного ПИП от времени τ напыления меди

В вакуумной камере создают необходимые технологические условия для процесса напыления катализатора. Напыление катализатора проводят одновременно на планарный ПИП и подложку. Поскольку планарный ПИП находится практически в равных технологических условиях с подложкой, то на его поверхностях формируется близкая по топологическим параметрам островковая наноструктурная пленка из материала катализатора. На всем протяжении процесса напыления катализатора контролируют емкость между электродами планарного ПИП. На начальном этапе (см. этап 1 на рис. 3, а) емкость планарного ПИП практически не изменяется, так как процесс синтеза островков катализатора только начинается и они находятся на большом расстоянии друг от друга. При появлении пикового значения емкости на планарном ПИП (см. этап 2 на рис. 3, а) процесс напыления катализатора завершают. Пик емкости появляется тогда, когда формируются в процессе роста максимальное число островков на минимальном расстоянии друг от друга. При дальнейшем продолжении процесса напыления островки будут сливаться в сплошную пленку (см. этап 3 на рис. 3, а).

Далее для синтеза нанобъектов начинают напылять углерод, из которого синтезируются нанобъекты на поверхности островкового катализатора. На этом этапе контроль роста пленочной наноструктуры проводят измерением сопротивления между электродами планарного ПИП (рис. 3, б). При синтезе растущие углеродные нанобъекты начинают электрически замыкать соседние островки (см. этап 1 на рис. 3, б) и при достижении определенного момента, когда это принимает массовый характер, сопротивление резко уменьшается (см. этап 2 на рис. 3, б).

При продолжении процесса напыления происходит перенасыщение углеродом поверхности катализатора, при этом поверхность покрывается аморфным углеродом (сажей) (см. этап 3 на рис. 3, б). Следовательно, остановка процесса синтеза углеродных нанобъектов должна производиться до начала массового образования аморфного углерода, что достигается в представленном методе при остановке процесса напыления на этапе 2 или в начале этапа 3 (см. рис. 3, б) в зависимости от необходимого заполнения поверхности подложки углеродными нанобъектами. На рисунке 4 представлены фотографии (полученные на электронном микроскопе ЭМВ-100А) синтезируемой углеродной наноструктурной пленки, соответствующие этапам напыления углерода на медный островковый катализатор.

Для автоматизации данного метода разработано реализующего его устройство на базе установки вакуумного напыления УВН-71 (рис. 5). Устройство представляет собой программно-аппаратный комплекс, в котором в качестве данных для управляющей программы используются значения измеряемой емкости и со-

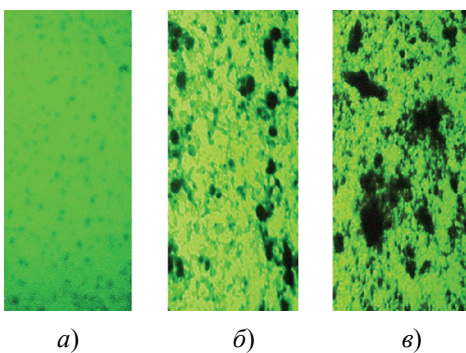


Рис. 4. Вид синтезируемых углеродных нанообъектов на медном островковом катализаторе от времени напыления углерода:
а, б, в – виды нанообъектов, соответствующие этапам *1, 2, 3* на рис. 3, *б*

отсекатели *4, 5* служат для практически мгновенного перекрытия молекулярных потоков от испарителей, которые в связи с инертностью продолжают некоторое время испарять вещества. В микропроцессоре в процессе синтеза осуществляется по соответствующей программе дифференциация изменения емкости на ПИП в целях определения момента наступления его экстремального значения. При достижении на планарном ПИП 2 экстремального значения емкости производится отключение испарителя *б* с веществом катализатора и перекрытие молекулярного потока от него, тем самым завершается процесс напыления островковых пленочных катализаторов на подложке *1*.

Затем автоматически по заданной программе включается дуговой испаритель углерода *7*. При напылении углерода АЦП 3 переключается в режим измерения сопротивления. В процессе напыления углерода на островковый катализатор происходит синтез углеродных нанообъектов, которые при своем росте электрически замыкают соседние островки, что фиксируется уменьшением сопротивления между электродами ПИП. В управляющей программе микропроцессорного устройства также путем дифференциации изменения сопротивления определяется момент наступления спада кривой (этап 2 на рис. 3, *б*), при наступлении которого останавливается процесс напыления углерода путем перекрытия молекулярного потока углерода отсекателем *5* и отключением испарителя *7*. Далее извлекают подложки с нанообъектами, заменяют планарный ПИП, устанавливают новые подложки и процесс синтеза повторяют.

противления планарного ПИП, задаваемые оператором основные параметры технологического процесса, а также граничные условия.

Аналоговый сигнал с планарного ПИП 2 (см. рис. 5) поступает в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 3 и после преобразования в цифровой сигнал поступает в микропроцессорное устройство 8. Микропроцессорное устройство по заданной программе производит управление процессом синтеза nanoостровкового катализатора и углеродных нанообъектов посредством изменения мощности испарителей и перекрытием молекулярных потоков испаряемых веществ. Молекулярные

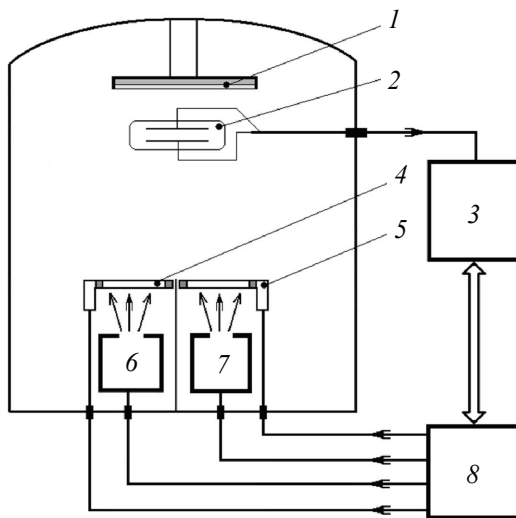


Рис. 5. Схема устройства, реализующего метод активного контроля электрофизических параметров структуры пленочных островковых катализаторов при синтезе нанообъектов

Заключение

Синтез нанобъектов на поверхности подложки в вакууме проводится при предварительном нанесении на него островкового катализатора. Метод вакуумного напыления веществ позволяет получать химически чистые катализаторы с равномерным распределением по поверхности подложки, что положительно влияет на качество синтезируемых нанобъектов.

Экспериментально установлено, что процесс синтеза углеродных нанобъектов по планарной технологии идет эффективнее при вакуумном напылении углерода не на сплошную пленку катализатора, а на пленку, имеющую островковую структуру, что предположительно связано с большим числом центров роста. Также проведенные исследования показали, что большое влияние на качество и количество нанобъектов при вакуумном напылении оказывают определение оптимального времени напыления островкового катализатора на поверхность подложки. Для определения момента прекращения напыления островкового катализатора предложен метод, заключающийся в дискретной выемке контрольных образцов из вакуумной камеры в заданные интервалы времени с последующим исследованием структуры синтезированной пленки на поверхности контрольных образцов с помощью электронного микроскопа. Скорость роста пленки и соответственно время, необходимое для роста пленки заданной толщины, определялись по математической модели. Проведенные эксперименты показали работоспособность предложенного метода и возможность использования его при синтезе нанобъектов в вакууме, однако, он имеет и некоторые недостатки, например, в математической модели не учитывается множество факторов, влияющих на процесс роста нанобъектов. Кроме того, данный метод является затратным в плане необходимости исследований с применением дорогостоящей электронной микроскопии. Поэтому применение данного метода возможно только на стадии разработки и отладки технологии синтеза островковой структуры катализатора и углеродных нанобъектов; с помощью него невозможно оперативно проводить контроль быстропротекающих процессов синтеза.

Для решения данных проблем разработан метод активного технологического контроля, суть которого заключается в измерении электрофизических параметров наноструктурных пленок непосредственно в процессе их синтеза и принятии решений по этим данным о продолжении или окончании процесса напыления.

Разработанный метод и реализующее его устройство позволяют в реальном режиме времени контролировать процесс роста островковой структуры пленочного катализатора, автоматически останавливать процесс при получении заданной структуры. Также метод позволяет вносить корректировки в технологические режимы и проводить синтез нанобъектов по наиболее выгодным технологическим режимам, при этом получать нанобъекты высокого качества и заданного вида, что также позволит исключить технологические операции по последующей очистке нанобъектов от примесей (аморфного углерода, сажи), требующих энергетических затрат и химических реактивов.

Список литературы

1. Запороцкова, И. В. Нанотехнологии и наноматериалы: научные, экономические и политические реалии нового века / И. В. Запороцкова // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. 3: Экономика. Экология. – 2015. – № 1 (30) – С. 18 – 29.

2. Лозовик, Ю. Е. Свойство и нанотехнологические применения нанотрубок / Ю. Е. Лозовик, А. М. Попов // Успехи физ. наук. – 2007. – Т. 177, № 7. – С. 786 – 799.
3. Раков, Э. Г. Пиролитический синтез углеродных нанотрубок и нановолокон / Э. Г. Раков // Рос. хим. журн. – 2004. – Т. XLVIII, № 5. – С. 12 – 20.
4. Богуславский, Л. И. Методы получения наночастиц и их размерно-чувствительные физические параметры / Л. И. Богуславский // Вестник МИТХТ. – 2010. – Т. 5, № 5. – С. 3 – 12.
5. Решетняк, Е. Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий / Е. Н. Решетняк, В. Е. Стрельницкий // Вопр. атом. науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130.
6. Левашов, Е. А., Многофункциональные наноструктурированные пленки / Е. А. Левашов, Д. В. Штанский // Успехи химии. – 2007. – Т. 76, № 5. – С. 501 – 509.
7. Образование nanoостровков при осаждении меди на поверхность Cu(111)-(9×9)-Ag / В. Ю. Юров [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 2007. – Т. 86, № 1. – С. 35 – 40.
8. Гумбин, В. В. Получение пленок гидрогенизированного кремния методом ионно-плазменного напыления / В. В. Гумбин, Д. В. Образцов, В. П. Шелохвостов // Интеграция науки и производства. – 2010. – № 5. – С. 52 – 53.
9. Микроструктура и механические свойства тонкого наноструктурированного покрытия, сформированного на магниевом сплаве AZ31 методом высокочастотного магнетронного осаждения при отрицательном смещении / М. А. Сурменева [и др.] // Вестн. Тамб. университета. Сер. Естеств. и техн. науки. – 2014. – Т. 19, вып. 6. – С. 1855 – 1862.
10. Пат. 2466207 Российская Федерация, МПК C23C 14/54, C23C 14/24, B82B 3/00, G01B 15/00. Способ синтеза наноструктурной пленки на изделии и устройство для его реализации / Образцов Д. В., Гумбин В. В., Шелохвостов В. П., Чернышов В. Н., Макаrchук М. В. ; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тамб. гос. техн. ун-т». – № 2010153001/02 ; заявл. 23.12.2010 ; опубл. 10.11.2012, Бюл № 31. – 23 с.
11. Образцов, Д. В. Метод и система активного технологического контроля синтеза нанообъектов / Д. В. Образцов, В. Н. Чернышов, В. П. Шелохвостов // Наноинженерия. – 2015. – № 8. – С. 27 – 32.

Method of Active Control over Electrophysical Parameters of Discontinuous Film Catalysts in the Process of Nanostructured Coatings Synthesis

D. V. Obratsov¹, V. N. Chernyshov¹, V. P. Shelokhvostov²

*Department of Criminal Law and Applied Computer Science in Law (1),
elters@crimeinfo.jesby.tstu.ru; Department of Materials and Technologies (2), TSTU*

Keywords: active process control; electrophysical control of discontinuous film catalysts and nanoobjects; discontinuous film catalyst; vacuum synthesis of nanoobjects.

Abstract: The paper considers the method of active control over electrophysical parameters of the structure of discontinuous film catalysts in the synthesis of nanostructured coatings. The authors created a process flow diagram of obtaining nanostructured coatings with predetermined parameters.

Nanoobjects and nanostructured coatings are increasingly used in such areas as power engineering, electronics, medicine, and chemical industry. The increased need for nanoobjects and nanostructured coatings have resulted in the intensification of the processes of their synthesis, which often negatively affects the quality of the final product. One solution to this problem is to conduct continuous monitoring of the process parameters in the synthesis of nanoobjects and nanostructured coatings. In practice, the synthesis of carbon nanoobjects is usually carried out on the catalysts that form carbides (e.g. nickel, iron, cobalt and other metals) and do not form carbides (e.g., copper, silver, gold, platinum and other metals). Metal carbide catalysts are mainly used in the synthesis of carbon nanostructures by pyrolysis of hydrocarbons, as these processes require high temperatures of 500...900 °C. Pyrolytic method is not applicable to the synthesis of nanostructures on plastics, low melting alloys and other surfaces that do not allow heating to such temperatures. A method of synthesis in vacuum can be applied for this type of nanostructured coatings.

References

1. Zaporotzkova I.V. [Nanotechnologies and Nanomaterials: Scientific, Economic and Political Realia of the New Century], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3. Ekonomika. Ekologiya* [Science Journal of VolSU. Global Economic System], 2015, no. 1 (30), pp. 18-29. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Lozovik Y.E., Popov A.M. Properties and nanotechnological applications of nanotubes, *Physics-Uspeski*, 2007, vol. 50, no. 7, pp. 749-761.
3. Rakov E.G. [Pyrolytic synthesis of carbon nanotubes and nanofibers], *Rossiiskii khimicheskii zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2004, vol. XLVIII, no. 5, pp. 12-20. (In Russ.)
4. Boguslavsky L.I. [Methods of synthesis of nanoparticles and their dimension-sensitive physical parameters], *Vestnik MITHT* [Bulletin of MITHT], 2010, vol. 5, no. 5, pp. 3-12. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Reshetnyak E.N., Strel'nitskij V.E. [Synthesis of hardening nanostructural coatings], *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki* [Problems of Atomic Science and Technology], 2008, no. 2, pp. 119-130. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Levashov E.A., Shtansky D.V. Multifunctional nanostructured films, *Russian Chemical Reviews*, 2007, vol. 76, no. 5, pp. 463-470.
7. Yurov V.Yu., Andryushechkin B.V., El'tsov K.N., Cherkez V.V. Formation of nanoislands in the course of copper deposition on a Cu(111)-(9×9)-Ag surface, *JETP Letters*, 2007, vol. 86, issue 1, pp. 33-38.
8. Gumbin V.V., Obraztsov D.V., Shelokhvostov V.P. [Getting hydrogenated silicon films by ion-plasma spraying], *Integratsiya nauki i proizvodstva* [Integration of science and production], 2010, no. 5, pp. 52-53.
9. Surmeneva M.A., Surmenev R.A., Tyurin A.I., Pirozhkova T.S., Stolyarov R.A. [Microstructure and mechanical properties of thin nanostructured hydroxyapatite coating fabricated on AZ31 alloy via radio-frequency magnetron sputtering at negative substrate bias], *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences], 2014, vol. 19, issue 6, pp. 1855-1862. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Obraztsov D.V., Gumbin V.V., Shelokhvostov V.P., Chernyshov V.N., Makarchuk M.V., Tambov State Technical University, *Sposob sinteza nanostrukturnoi plenki na izdelii i ustroystvo dlya ego realizatsii* [A method for synthesizing nanostructured film on the product and the device for its realization], Russian Federation, 2012, Pat. 2466207. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Obraztsov D.V., Chernyshov V.N., Shelokhvostov V.P. [Method and system for active process control of the synthesis of nanoobjects], *Nanoinzheneriya* [Nano Engineering], 2015, no. 8, pp. 27-32. (In Russ., abstract in Eng.)

Methode der aktiven technologischen Kontrolle der elektrophysikalischen Parameter der Filmkatalysatoren bei der Vakuumsynthese

Zusammenfassung: Es ist die Methode der aktiven technologischen Kontrolle der elektrophysikalischen Parameter der Struktur der Inselfolienkatalysatoren bei der Synthese der Nanoobjekte betrachtet. Es ist das technologische Schema der Realisierung des Prozesses des Erhaltens der Nanoobjekte der aufgegebenen Parameter angeführt.

Méthode du contrôle active technologique des paramètres électrophysiques des catalyseurs pelliculeux d'îlot lors de la synthèse sous vide des nanoobjets

Résumé: Est examinée le contrôle active technologique des paramètres électrophysiques de la structure des catalyseurs pelliculeux d'îlot lors de la synthèse sous vide des nanoobjets. Est cité le schéma technologique de la réalisation du processus d'obtention des nanoobjets des paramètres donnés.

Авторы: *Образцов Денис Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; *Чернышов Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; *Шелохвостов Виктор Прокопьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Чуриков Александр Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
