

## ПОЛУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИИ

Н.А. Булычев

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),  
Волоколамское шоссе 4, Москва 125993, Россия, nbulychev@mail.ru

В настоящей работе проведено исследование плазмохимических процессов, которые определяются сочетанием воздействия на жидкофазные среды термически неравновесной низкотемпературной плазмы и интенсивных ультразвуковых колебаний в режиме развитой кавитации. Разработанный метод реализации плазмохимических превращений представляет значительный интерес и преимущества для создания новых наноразмерных материалов с особыми свойствами, т.к. позволяет направленно варьировать электрофизические и акустические характеристики процесса при осуществлении плазмохимических реакций. Отличительным признаком и существенным преимуществом данного метода является то, что одновременное воздействие на зону реакции термически неравновесной плазмы и ультразвуковой кавитации приводит к созданию условий, недостижимых в других случаях и обуславливает протекание реакций при высокой локальной концентрации энергии и активных частиц. Было установлено, что в таком акустоплазменном разряде возможно синтезировать наночастицы металлов и их оксидов различного состава, показано, что синтезированные в таких условиях наночастицы различного состава обладают активированной поверхностью с большим количеством нескомпенсированных связей и дефектов в результате действия на них интенсивного ультразвука и способны к эффективному взаимодействию с органическими и полимерными матрицами, что дает возможность создавать на их основе новые гибридные органо-неорганические композиционные материалы.

**Ключевые слова:** плазма; ультразвук; кавитация; наночастицы; оксиды металлов; композиционные материалы.

## FABRICATION OF FUNCTIONAL NANO-SIZED MATERIALS IN LOW-TEMPERATURE PLASMA UNDER THE EFFECT OF ULTRASONIC CAVITATION

Nikolay Bulychev

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
4 Volokolamskoe shosse, 125993 Moscow, Russia, nbulychev@mail.ru

This paper presents the results of the targeted fabrication of functional nano-sized materials with high physicochemical activity. A promising method has been developed for the synthesis of nano-sized particles of various chemical composition (metals, metal oxides, hybrid nanoparticles) by initiating thermally nonequilibrium low-temperature plasma in liquid-phase media in the zone of ultrasonic cavitation. In addition to the interest in this phenomenon as a new object of fundamental physical and chemical study, this synthetic method ensures the fabrication of nanoparticles with an activated reactive surface due to a large number of surface defects, uncompensated bonds, charges, etc. Such nanoparticles have been shown to have increased activity when interacting with organic compounds, in particular with (bio)macromolecules. Nanoparticles of tin, zinc, aluminum, iron, and copper oxides obtained by the plasma discharge under the influence of ultrasonic cavitation were studied by dynamic light scattering and electron microscopy. Surface properties (the ability of the nanoparticle surface to interact with organic macromolecules) were studied by measuring the electrokinetic potential of the particle surface. It has been shown that ultrasonic treatment activates the surface of nanoparticles and promotes their more effective interaction with polymer molecules. It has been proven by the measured increase in the value of the electrokinetic potential of the particle surface after ultrasonic treatment, as well as an increase (2-4 times) in the thickness of the adsorption layers of the polymer on the surface of nanoparticles.

**Keywords:** plasma; ultrasound; cavitation; nanoparticles; metal oxides; composite materials.

### Введение

Исследованные в рамках настоящей ра-

боты наночастицы оксидов металлов были синтезированы в плазменном разряде под

действием ультразвуковой кавитации по методике, отработанной ранее [1-3]. Как было показано в предыдущих исследованиях, комбинированное воздействие на жидкую среду импульсных или стационарных электрических полей и ультразвуковых колебаний высокой интенсивности выше порога кавитации приводит к возникновению в кавитирующей жидкой среде особой формы электрического разряда [1].

При этом использование ультразвуковой кавитации позволяет решить задачу предотвращения агломерации синтезированных наночастиц после синтеза и активирует их поверхность, создавая на ней дополнительные активные центры адсорбции, что способствует эффективному взаимодействию таких частиц с органическими полимерами и позволяет создавать полимерные композиционные материалы с высокими эксплуатационными свойствами [4].

### Результаты и их обсуждение

Разработанный метод реализации плазмохимических превращений представляет значительный интерес и преимущества для создания новых наноразмерных материалов с особыми свойствами, т.к. позволяет направленно варьировать электрофизические и акустические характеристики процесса при осуществлении плазмохимических реакций. Практическим следствием решения данной проблемы является создание метода направленного синтеза значимых веществ. Было установлено, что в таком акустоплазменном разряде возможно синтезировать наночастицы металлов и их оксидов различного состава, при этом размер первичных наночастиц находился на уровне 20–80 нм. в зависимости от материала.

В работах по этому направлению показано, что синтезированные в таких условиях наночастицы различного состава обладают активированной поверхностью с большим количеством нескомпенсирован-

ных связей и дефектов в результате действия на них интенсивного ультразвука и тем самым способны к эффективному взаимодействию с органическими и неорганическими соединениями, матрицами и т.д., что дает возможность создавать на их основе новые гибридные органо-неорганические композиционные материалы.

Продолжением данного подхода является создание на основе синтезированных дисперсных систем наночастиц оксидов металлов композиционных материалов с использованием органической полимерной матрицы на основе полиэтилена и винилацетата, пригодных для применения в качестве функциональных и конструкционных материалов, исследование принципов их формирования и свойств, в том числе с использованием ультразвуковой кавитации, а также создание композиционных материалов с заданными характеристиками.

Было установлено, что синтезированные частицы имеют пик распределения в области размеров 50-60 нм, ширина кривой распределения по размерам находится в пределах 30-80 нм. При ультразвуковом воздействии на суспензии наночастиц агломераты распадаются, и пик распределения смещается в область 30-40 нм, при этом ширина кривой распределения по размерам сужается до 25-55 нм. Измеренное значение электрохимического потенциала поверхности исходных наночастиц в водной дисперсионной среде составляет, например, для наночастиц оксида олова - 28 мВ и увеличивается при действии интенсивного ультразвука до -34 мВ.

При исследовании оптических свойств синтезируемых наноматериалов было обнаружено, что наночастицы, синтезированные в плазменном разряде под действием ультразвуковой кавитации обладают большей интенсивностью люминесценции по сравнению с частицами, синтезированными в разряде без кавитации. Это согласуется с ранее полученными данными о большей величине адсорбции на

частицах, полученных под действием ультразвуковой кавитации, что указывает на образование поверхностных дефектов, ответственных за интенсивность люминесценции и адсорбции.

С использованием данных двух видов наночастиц (до и после ультразвукового воздействия) получены образцы пленок полимерных композиционных материалов. Далее методами сканирующей электронной микроскопии, рентгенофлюоресцентного анализа были охарактеризованы образцы пленок полимерного композиционного материала на основе наночастиц и подтверждено включение наночастиц в полимерную матрицу. СЭМ-изображения полимерных пленок, полученных на основе наночастиц, подвергнутых предварительному ультразвуковому воздействию показывают, что агломераты частиц практически не наблюдаются, размер наночастиц, распределенных в полимерной матрице составляет примерно 30-50 нм.

Результаты исследований методом сканирующей электронной микроскопии изломов пленок, полученных при температуре жидкого азота, показывают, что структура материала является достаточно целостной, видимые крупные дефекты и полости отсутствуют. Проведены физико-механические испытания пленки из композиционного материала с различным содержанием наночастиц: 1 и 3% масс. Получены данные о значениях модуля упругости, коэффициента Пуассона, предела пропорциональности, модуля сдвига, предела текучести, предела прочности и предельной деформации. Результаты механических испытаний показывают, что ультразвуковая обработка наночастиц перед их импрегнированием в полимерную матрицу положительно влияет на физико-механические свойства пленок из исследованного композиционного материала.

## Заключение

В плазменном разряде в жидкости под действием ультразвука синтезированы наночастицы оксидов металлов с размером 50-60 нм, а при ультразвуковом воздействии с размером 30-40 нм и использованы для получения композиционного материала. Из полученных результатов можно сделать вывод, что применение предварительной ультразвуковой обработки наночастиц наполнителя перед их введением в полимерную матрицу повышает гомогенность частиц и обеспечивает их более равномерное распределение в композиционном материале, что положительно сказывается на физико-механических свойствах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-19-00540.

## Библиографические ссылки

1. Butusova O.A., Kaptakov M.O., Babaytsev A.V., Okorokova N.S., Garibyan B.A., Filatov S.A., Bulychev N.A. Plasma discharge in liquid media under the effect of ultrasound for the synthesis of fillers for polymer composites with enhanced mechanical strength and gas permeability. *High Temperature Material Processes* 2024; 28(4): 1-9.
2. Bulychev N.A. Facile synthesis of stable nanosized silver clusters in plasma discharge under ultrasonic cavitation. *Fusion Science and Technology* 2024; 80(7): 916-921.
3. Butusova O.A., Mikhaylov Yu.G., Mamonov V.A., Bulychev N.A. Study of hydrogen permeability in polymer films with metal oxide nanoparticles synthesized in plasma under the effect of ultrasound. *International Journal of Hydrogen Energy* 2024; 87: 68-75.
4. Bulychev N.A. Physical and mechanical properties of polymer films with tin oxide nanoparticles obtained in plasma discharge under the effect of ultrasound. *High Energy Chemistry* 2024; 58(2): S111-S114.