УДК 620.22 + 544.42 : 537.63

**Исследование влияния электромагнитного поля и энерго-механической обработки на процесс получения наноразмерных порошков металлического кобальта восстановлением водородом**

©2017 г. В.М. Нгуен, Ю.В. Конюхов, Д.И. Рыжонков[[1]](#footnote-1)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Реферат

*Аннотация:* Нанопорошки (НП) на основе кобальта имеют значительные перспективы использования в различных областях науки, техники, промышленности и в медицине. В данной работе была исследована кинетика процессов получения нанопорошков металлического кобальта водородным восстановлением из оксидного материала в электромагнитном полеипри энерго-механической обработке (ЭМО) в вихревом слое ферромагнитных частиц, вращающихся под действием этого поля. НП оксида кобальта Co3O4 получали путем термического разложения синтезированного химическим осаждением гидроксидного соединения Co(OH)2 из 10 %-ных водных растворов соли нитрата Co(NO3)2 и едкого натра NaOH при установленных условиях pH = 9, t = 20 °С. Восстановление образцов НП Co3O4 для получения наноразмерных частиц Co проводили на установке модифицированного аппарата вихревого слоя (АВС) модели УАП-3 с встроенными внутри камеры нагревательной печью и проточным реактором. Амплитудное значение индукции поля внутри реактора составляет 0,16 Тл. Выбор экспериментальных температур восстановления образцов выполняли на основе результата термогравиметрического (ТГ) анализа исходного образца гидроксида кобальта. Кинетические параметры процессов водородного восстановления в условиях линейного нагрева и в изотермии рассчитаны с помощью моделей Фримена-Кэрола и Мак Кэвана, соответственно. Обнаружено снижение скорости получения нанопорошков Co в электромагнитном поле (до 14 % при 250 ºС) вследствие затруднения способности адсорбции атомов водорода на поверхности образованных металлических наночастиц. Установлено, что ЭМО в вихревом слое приводит к повышению скорости процесса в 4-5 раз благодаря эффекта механоактивации материала. С использованием методов термогравиметрии, рентгеновской дифрактометрии, электронной микроскопии и измерения удельной поверхности по низкотемпературной адсорбции азота были изучены свойства исходного материала и полученных продуктов. Показано, что при восстановлении образцов в электромагнитном поле формируются более мелкодисперсных наночастиц Co, чем в случае без поля. ЭМО в вихревом слое приводит к агрегированию восстановленных металлических наночастиц и образованию гранул микронного размера.

*Ключевые слова:*нанопорошок кобальта, кинетика восстановления, аппарат вихревого слоя, электромагнитное поле, энерго-механическая обработка, константа скорости, термогравиметрический анализ, средний размер частиц.

**Investigation of the influence of electromagnetic field and energy-mechanical processing on the production of metallic cobalt nanopowder by hydrogen reduction**

Nguyen V.M., Konyukhov Yu.V., Ryzhonkov D.I.

National University of Science and Technology MISiS, Moscow

*Abstract:*Nanopowders (NP) based on cobalt have significant prospects for use in various fields of science, engineering, industry and medicine. In this work we studied the kinetics of the production of metallic cobalt nanopowder by hydrogen reduction of oxide material Co3O4 in an electromagnetic field, and with an energy-mechanical processing (EMP) in eddy layer created by ferromagnetic bodies subjected to such field. Cobalt oxide Co3O4 NP was obtained by thermal decomposition of the hydroxide compound Co(OH)2 chemical-precipitated from 10% aqueous solutions of nitrate cobalt Co(NO3)2 and sodium hydroxide NaOH under the conditions of pH = 9, t = 20 ° C. The production of metallic cobalt nanoparticles by the hydrogen reduction of Co3O4 NP was carried out on the apparatus of eddy layer (AED) of UAP-3 model modified with an internal heating furnace and a flow reactor. The amplitude value of induction of magnetic field inside the reactor is 0.16 T. The experimental temperatures of the reduction process were chosen based on the result of a thermogravimetric analysis (TGA) of the initial cobalt hydroxide sample. The kinetic parameters of hydrogen reduction processes under linear heating and in isothermal conditions were calculated using the Freeman-Carroll and McKewan models, respectively. We found a decrease in the rate of obtaining Co nanopowder in the electromagnetic field (up to 14% at 250 ° C) due to the decrease in the adsorption ability of hydrogen atoms on the surface of the formed metallic nanoparticles. EMP in the eddy layer leads to an increase in the reduction rate by 4-5 times due to the effect of mechanical activation of the material. The properties of the initial material and the obtained products were investigated using the methods such as thermogravimetry, X-ray diffractometry, electron microscopy and measurement of the specific surface area by low-temperature nitrogen adsorption. It was shown that the reduction of samples in the electromagnetic field facilitate the formation of finer-dispersed Co nanoparticles, than in the case without the field. The EMP in the eddy layer leads to the aggregation of the formed metallic nanoparticles and the formation of granules of micron size.

*Keywords:* cobalt [nanopowder](http://powder.misis.ru/index.php/jour/search/?subject=nanopowders), reduction kinetics, apparatus of eddy layer, electro[magnetic field](http://powder.misis.ru/index.php/jour/search/?subject=magnetic%20field), energy-mechanical processing, rate constant, [thermo-gravimetric analysis](http://powder.misis.ru/index.php/jour/search/?subject=thermo-gravimetric%20analysis), average particle size.

**Сведения об авторах**

1. **Нгуен Ван Минь** – аспирант каф. Функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС» (Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). Моб. тел. для связи: (929) 529-29-57. E-mail: chinhnhan88@gmail.com.
2. **Конюхов Юрий Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, каф. Функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС» (Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (916) 344-35-36. E-mail: martensit@mail.ru.
3. **Рыжонков Дмитрий Иванович** – докт. техн. наук, член-корреспондент РАЕН РФ, профессор-консультант каф. Функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС» (Россия, 119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (915) 167-44-71. E-mail: diryzhonkov@mail.ru.
4. **Nguyen Van Minh –** postgraduate student, Department of functional nanosystems and high-temperature materials of the National University of Science and Technology "MISiS" (Russia, 119049, Moscow, Leninsky Avenue, 4). E-mail: chinhnhan88@gmail.com.
5. **Konyukhov Yuri Vladimirovich –** PhD. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of functional nanosystems and high-temperature materials of the National University of Science and Technology "MISiS". E-mail: martensit@mail.ru.
6. **Ryzhonkov Dmitri Ivanovich –** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of functional nanosystems and high-temperature materials of the National University of Science and Technology "MISiS". E-mail: diryzhonkov@mail.ru.

1. **В.М. Нгуен** – аспирант каф. Функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (929) 529-29-57. E-mail: [chinhnhan88@gmail.com](mailto:chinhnhan88@gmail.com).

   **Ю.В. Конюхов** – канд. техн. наук, доцент, зам. зав. каф. Функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС». Тел.: (495) 995-00-49. E-mail: [martensit@mail.ru](mailto:martensit@mail.ru).

   **Д.И. Рыжонков** – докт. техн. наук, член-корреспондент АЕН РФ, профессор-консультант каф. Функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС». Тел.: (495) 955-00-49. E-mail: [diryzhonkov@mail.ru](mailto:diryzhonkov@mail.ru). [↑](#footnote-ref-1)