

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛОУГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ: КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМЫ НУКЛЕАЦИИ И РОСТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЯДЕР И ФОРМИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНОЙ ОБОЛОЧКИ*

П. А. Власов¹, И. В. Жильцова², В. Н. Смирнов³, А. М. Тереза⁴, А. Е. Сычев⁵,
А. С. Щукин⁶, А. Н. Стрелецкий⁷, А. Б. Борунова⁸

Аннотация: Проведено экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование процесса образования наночастиц чистого железа при термическом распаде пентакарбонила железа $\text{Fe}(\text{CO})_5$, наночастиц углерода (сажи) при пиролизе этилена C_2H_4 и наночастиц железа, инкапсулированных в углеродную оболочку при нагреве смеси $\text{Fe}(\text{CO})_5$ и C_2H_4 в аргоне в отраженных ударных волнах. Исследована микроструктура этих наночастиц на автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе сверхвысокого разрешения Zeiss Ultra plus на базе Ultra 55, а также проведено детальное кинетическое моделирование процессов термического распада молекул пентакарбонила железа и конденсации атомов железа с образованием наночастиц железа, образования частиц углерода (сажи) при пиролизе этилена и процесса совместного образования наночастиц железа и углерода и наночастиц железа, покрытых углеродной оболочкой.

Ключевые слова: инкапсулированные наночастицы; микроструктура наночастиц; сканирующий электронный микроскоп; ударные волны; кинетическое моделирование

Литература

1. *Hermann I. K., Grass R. N., Stark W. J.* High-strength metal nanomagnets for diagnostics and medicine: Carbon shells allow long-term stability and reliable linker chemistry // *Nanomedicine*, 2009. Vol. 4. P. 787–798.
2. *Xu Y., Mahmood M., Li Z., Dervishi E., Trigwell S., Zharov V. P., Ali N., Saini V., Biris A. R., Lupu D., Boldor D., Biris A. S.* Cobalt nanoparticles coated with graphitic shells as localized radio frequency absorbers for cancer therapy // *Nanotechnology*, 2008. Vol. 19. No. 43. P. 435102.
3. *Ермаков А. Е., Уймин М. А., Локтева Е. С., Мысик А. А., Качевский С. А., Туракулова А. О., Гавико В. С., Лушин В. В.* Синтез структура и свойства углеродсодержащих нанокомпозитов на основе никеля, палладия и железа // *ЖФХ*, 2009. Т. 83. № 7. С. 1338–1345.
4. *Zhao D.-L., Li X., Shen Z.-M.* Preparation and electromagnetic and microwave absorbing properties of Fe-filled carbon nanotubes // *J. Alloy. Compd.*, 2009. Vol. 471. P. 457–460.
5. *Liu Q., Cao B., Feng C., Zhang W., Zhu S., Zhang D.* High permittivity and microwave absorption of porous graphitic carbons encapsulating Fe nanoparticles // *Compos. Sci. Technol.*, 2012. Vol. 72. P. 1632–1636.
6. *Tyagi S., Verma P., Baskey H. B., Agarwala R. C., Agarwala V., Shami T. C.* Microwave absorption study of carbon nanotubes dispersed hard/soft ferrite nanocomposite // *Ceramics International*, 2012. Vol. 38. P. 4561–4571.
7. *David B., Pizurova N., Schneeweiss O., Bezdicka P., Morjan I., Alexandrescu R.* Preparation of iron/graphite core-shell structured nanoparticles // *J. Alloy. Compd.*, 2004. Vol. 378. P. 112–116.
8. *Tokoro H., Fujii S., Muto S., Nasu S.* Fe–Co and Fe–Ni magnetic fine particles encapsulated by graphite carbon // *J. Appl. Phys.*, 2006. Vol. 99. P. 08Q512.
9. *Fan N., Ma X., Ju Zh., Li J.* Formation, characterization and magnetic properties of carbon-encapsulated iron carbide nanoparticles // *Mater. Res. Bull.*, 2008. Vol. 43. P. 1549–1554.
10. *Bystrzejewski M., Pyszynska K., Huczko A., Lange H.* Carbon-encapsulated magnetic nanoparticles as separa-

* Работа выполнена в рамках Программы № 31П Президиума РАН «Фундаментальные исследования процессов горения и взрыва».

¹ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», iz@chph.ras.ru

² Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, zaslonko@chph.ras.ru

³ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, vns1951@yandex.ru

⁴ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, atereza@bk.ru

⁵ Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, sytshev@ism.ac.ru

⁶ Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, shchukin@ism.ac.ru

⁷ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, str@center.chph.ras.ru

⁸ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, aborunova@mail.ru

- ble and mobile sorbents of heavy metal ions from aqueous solutions // *Carbon*, 2009. Vol. 47. No. 4. P. 1201–1204.
11. *Ning L., Xiaojie L., Xiaohong W., Honghao Y., Fei M., Weighing S.* Preparation and magnetic behavior of carbon-encapsulated iron nanoparticles by detonation method // *Compos. Sci. Technol.*, 2009. Vol. 69. P. 2554–2558.
 12. *Ning L., Xiaojie L., Xiaohong W., Honghao Y., Chengjiao Zh., Haitao W.* Synthesis and characterization of carbon-encapsulated iron/iron carbide nanoparticles by a detonation method // *Carbon*, 2010. Vol. 48. P. 3858–3863.
 13. *Atkinson J. D., Fortunato M. E., Dastgheib S. A., Rostam-Abadi M., Rood M. J., Suslick K. S.* Synthesis and characterization of iron-impregnated porous carbon spheres prepared by ultrasonic spray pyrolysis // *Carbon*, 2011. Vol. 49. P. 587–598.
 14. *Цурин В. А., Ермаков А. Е., Уймин М. А., Мысик А. А., Щеголева Н. Н., Гавико В. С., Майков В. В.* Синтез, структура и магнитные свойства наночастиц железа и никеля, капсулированных в углерод // *Физика твердого тела*, 2014. Т. 56. № 2. С. 287–300.
 15. *Lee K., Kim M., Kim H.* Catalytic nanoparticles being facet-controlled // *J. Mater. Chem.*, 2010. Vol. 20. P. 3791–3798.
 16. *He Z., Maurice J.-L., Gohier A., Lee C. S., Pribat D., Cojocaru C. S.* Iron catalysts for the growth of carbon nanofibers: Fe, Fe₃C or both? // *Chem. Mater.*, 2011. Vol. 23. P. 5379–5387.
 17. *Гуренцов Е. В., Еремин А. В.* Синтез металлоуглеродных наночастиц при импульсном УФ-фотолизе смесей Fe(CO)₅ с CCl₄ при комнатной температуре // *Письма в ЖТФ*, 2015. Т. 41. № 11. С. 71–78.
 18. *Agafonov G. L., Smirnov V. N., Vlasov P. A.* Shock tube and modeling study of soot formation during pyrolysis of propane, propane/toluene and rich propane/oxygen mixtures // *Combust. Sci. Technol.*, 2010. Vol. 182. P. 1645–1671.
 19. *Agafonov G. L., Smirnov V. N., Vlasov P. A.* Shock tube and modeling study of soot formation during the pyrolysis and oxidation of a number of aliphatic and aromatic hydrocarbons // *Proc. Combust. Inst.*, 2011. Vol. 33. P. 625–632.
 20. *Agafonov G. L., Smirnov V. N., Vlasov P. A.* Effect of iron pentacarbonyl on soot formation behind shock waves // *Combust. Sci. Technol.*, 2012. Vol. 184. No. 10–11. P. 1838–1861.
 21. *Смирнов В. Н.* Термическая диссоциация газообразных гидридов и металлоорганических соединений и реакции продуктов их распада. Дис. . . . д-ра физ.-мат. наук. — М.: ИХФ РАН, 2008. 490 с.
 22. *Агафонов Г. Л., Билера И. В., Власов П. А., Колбановский Ю. А., Смирнов В. Н., Тереза А. М.* Образование сажи при пиролизе и окислении ацетилен и этилена в ударных волнах // *Кинетика и катализ*, 2015. Т. 56. № 1. С. 15–35.
 23. *Агафонов Г. Л., Билера И. В., Власов П. А., Жильцова И. В., Колбановский Ю. А., Смирнов В. Н., Тереза А. М.* Единая кинетическая модель сажеобразования при пиролизе и окислении алифатических и ароматических углеводородов в ударных волнах // *Кинетика и катализ*, 2016. Т. 57. № 5. С. 571–587.
 24. *Wen J. Z., Goldsmith C. F., Ashcraft R. W., Green W. H.* Detailed kinetic modeling of iron nanoparticle synthesis from the decomposition of Fe(CO)₅ // *J. Phys. Chem. C*, 2007. Vol. 111. P. 5677–5688.

Поступила в редакцию 14.02.17