

УДК 538.975, 66.017

**СТРУКТУРА И МОРФОЛОГИЯ УНТ,
СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА НАНОПОРОШКАХ Ni****Г. Партизан^{1,2}, Б.З. Мансуров¹, Б.С. Медянова^{1,2},
А.Б. Кошанова^{1,2}, Б.А. Алиев², Xin Jiang³**¹Институт проблем горения, 050012, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан²Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, 050040, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан³Institute of Materials Engineering, University of Siegen, Paul-Bonatz-Straße 9-11, 57076, Siegen, Germany

E-mail: gulmira.partizan@gmail.com

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментов по синтезу углеродных наноструктур методом термического химического осаждения из газовой фазы с использованием нанопорошков никеля, полученных методом электрического взрыва проводников в качестве катализаторов. В ходе проведённых экспериментов были определены технологические параметры, оптимальные для низкотемпературного роста углеродных нанотрубок. СЭМ-исследования выявили существование диапазона температур и давлений между низко- и высокотемпературными режимами синтеза, в котором не происходит рост углеродных наноструктур. Результаты спектроскопии комбинационного рассеяния света и рентгеноструктурного анализа показали, что наиболее высокой кристалличностью обладают образцы, выращенные на нижней температурной границе, определённой в ходе проведения экспериментов. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии указывают на то, что синтезированные структуры являются многостенными углеродными нанотрубками с кластерами металла внутри канала трубки.

Ключевые слова: термическое химическое осаждение, углеродные наноструктуры, нанопорошки металла, медная пленка, многостенные углеродные нанотрубки.

Введение

С момента своего открытия углеродные нанотрубки (УНТ) стали объектами многочисленных экспериментальных и теоретических исследований. Целью этих экспериментов были исследование условий получения и анализ их уникальных механических, химических и электрических свойств. Официально принято считать, что УНТ впервые были обнаружены в 1991 году в саже, которая образовывалась на электродах в условиях дугового разряда [1]. Однако о существовании углеродных нанотрубок сообщали ранее советские ученые Л.В. Радужкевич и В.М. Лукьянович в 1952 г. [2]. Эти работы не привлекли широкого внимания научного сообщества, в связи с их публикацией только на русском языке. За последние два десятилетия были разработаны такие методы получения углеродных нанотрубок (УНТ), как различные виды ХОГФ (chemical vapor deposition – химическое осаждение из газовой фазы), синтез в пламенах углеводородов и дуговом разряде [1, 3-5]. Несмотря на то, что эти

методы достигли высокого уровня качества, они всё ещё далеки до полного контроля над важными структурными свойствами, такими как длина нанотрубок, их диаметр и хиральность [6].

Широко используемый способ получения УНТ основан на использовании процесса разложения газообразного углеводорода в присутствии катализаторов. В качестве катализаторов чаще всего используются частицы металлов Ni, Co, Cu и Fe размером несколько десятков нанометров. Как правило, при использовании в качестве катализатора никеля синтез проводится при высоких температурах – 700-1000°C [1].

На сегодняшний день применяются несколько методик подготовки металлических нанокластеров для синтеза УНТ. Одним из перспективных методов получения нанопорошков (НП) является электрический взрыв проводников (ЭВП) – неравновесный процесс, при котором под действием импульсного электрического тока проводник диспергируется, и продукты взрыва перемешиваются с окружающей средой. Электровзрывные НП обладают рядом преимуществ в сравнении с НП, полученными другими способами: устойчивы к окислению и спеканию при комнатной температуре, при нагревании характеризуются

высокой химической и диффузионной активностью [7].

В методике термического ХОГФ, как правило, эксперименты проводятся при высоких температурах (700-1200°C) и давлениях ниже атмосферного. При этом используются различные углеводородные прекурсоры (метан, ацетилен, бензол и др.), чаще всего в сочетании с инертными газами, а также водородом, азотом и др. [8, 9].

Целью проведения исследований являлись – определение нижней температурной границы роста углеродных наноструктур (УНС) на ЭВП НП, оптимальных условий низкотемпературного (энергетически выгодного) синтеза с использованием наиболее доступных углеводородов и без добавок дорогостоящих инертных и других газов.

Детали эксперимента

НП были приобретены в Томском политехническом университете с целью использования их в качестве катализаторов при синтезе углеродных наноструктур. В Отделе поверхности и технологий новых материалов Института Материаловедения Университета г. Зиген (Германия) (Institute of Materials Engineering, University of Siegen, Siegen, Germany) были проведены совместные исследования структу-

ры и морфологии ЭВП НП, их каталитической активности и возможности синтеза на них УНС методом термического ХОГФ [10, 11].

Синтез УНС

Рост УНС проводился в объеме кварцевого реактора с внутренним диаметром 90 мм помещенным внутри горизонтальной трехзонной трубчатой печи (Carbolite Limited) длиной 1150 мм.

Катализатор загружался в керамическую лодочку и после установки образца в реактор, производилась откачка объема механическим форвакуумным насосом в течение 30 минут (до давления 10^{-2} бар).

Далее реактор нагревался до необходимой температуры с контролируемой скоростью (скорость нагрева варьировалась от 5 до 10 °C/мин.).

После достижения заданной температуры в реактор подавался рабочий газ – ацетилен до необходимого значения давления. По окончании проведения синтеза (время экспериментов от 1 до 3 часов), производилась откачка остаточных газов и охлаждение реактора до комнатной температуры, также с заданной скоростью.

Схема установки для синтеза УНС показана на рисунке 1.

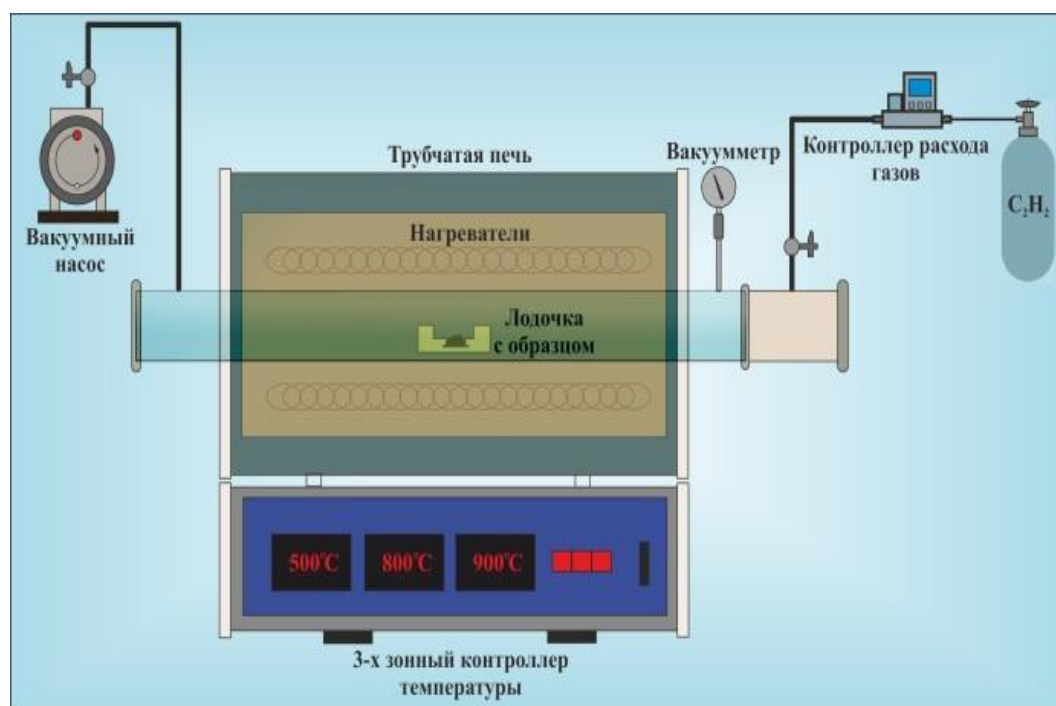


Рис. 1 – Схема технологической установки

Методики и аппаратура для изучения морфологии и структуры УНС

Для изучения морфологии образцов использовался автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) сверхвысокого разрешения фирмы Zeiss модели Gemini Ultra 55 вместе с устройством для рентгеноспектрального микроанализа исследуемого образца в микроскопе от фирмы – «Thermo Scientific». Исследования были выполнены в Институте Материаловедения Университета г. Зиген (Германия).

Изучение структуры УНС проводилось методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометров Philips X'Pert PRO MRD (Институт Материаловедения Университета г. Зиген, Германия) и Rigaku D/max/2400 XRD (Шеньянская Национальная лаборатория материаловедения, Китайской Академии Наук).

Рентгенограммы образцов были получены с применением медного излучения ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) в цифровом виде. Обработка рентгенограмм для определения углового положения и интенсивностей рефлексов проводилась программой OriginPro 8.1. При проведении фазового анализа использовалась программа PCPDFWIN с базой дифрактометрических данных PDF-2.

В Национальной нанотехнологической лаборатории открытого типа (г. Алматы, Казахстан) образцы были исследованы методом спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) с помощью спектрометра NT-MDT NTegra Spectra (длина волны лазерного излучения $\lambda = 473 \text{ нм}$).

Анализ образцов методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) был проведен в Институте Ядерной Физики (г. Алматы, Казахстан) с помощью микроскопа JEOL JEM-2100F.

Результаты и обсуждение

СЭМ-исследования

Для определения оптимальных условий синтеза УНС и нижней температурной границы были проведены эксперименты при различных температурах (200–700°C) и давлениях (100–400 мбар).

Эксперименты показали, что нижней температурной границей при синтезе УНС является 325°C во всем исследуемом диапазоне

давлений. Очевидно, что при более низких температурах не происходит каталитического разложения ацетилена. При температурах выше 375°C наблюдалось зауглероживание кластеров. Таким образом, в ходе предварительных экспериментов были определены оптимальные экспериментальные параметры для низкотемпературного синтеза: температура – 325–375°C, давление – 100–300 мбар. Дальнейшие, более детальные исследования проводились в этих экспериментальных диапазонах.

На рисунке 2 представлены СЭМ-изображения УНС на ЭВП НП Ni, полученных при температурах 325–375°C и давлении 100 мбар.

Как видно на СЭМ-изображениях стабильный рост УНС происходит именно при низкой температуре (325°C). При этом они имеют различный диаметр (50–100 нм) и морфологию (от спиралевидных до прямых). При температурах 350°C и 375°C наблюдается зауглероживание кластеров металла (рисунок 2 д, е).

На рисунке 3 приведены СЭМ-изображения УНС, синтезированных при давлении 200 мбар.

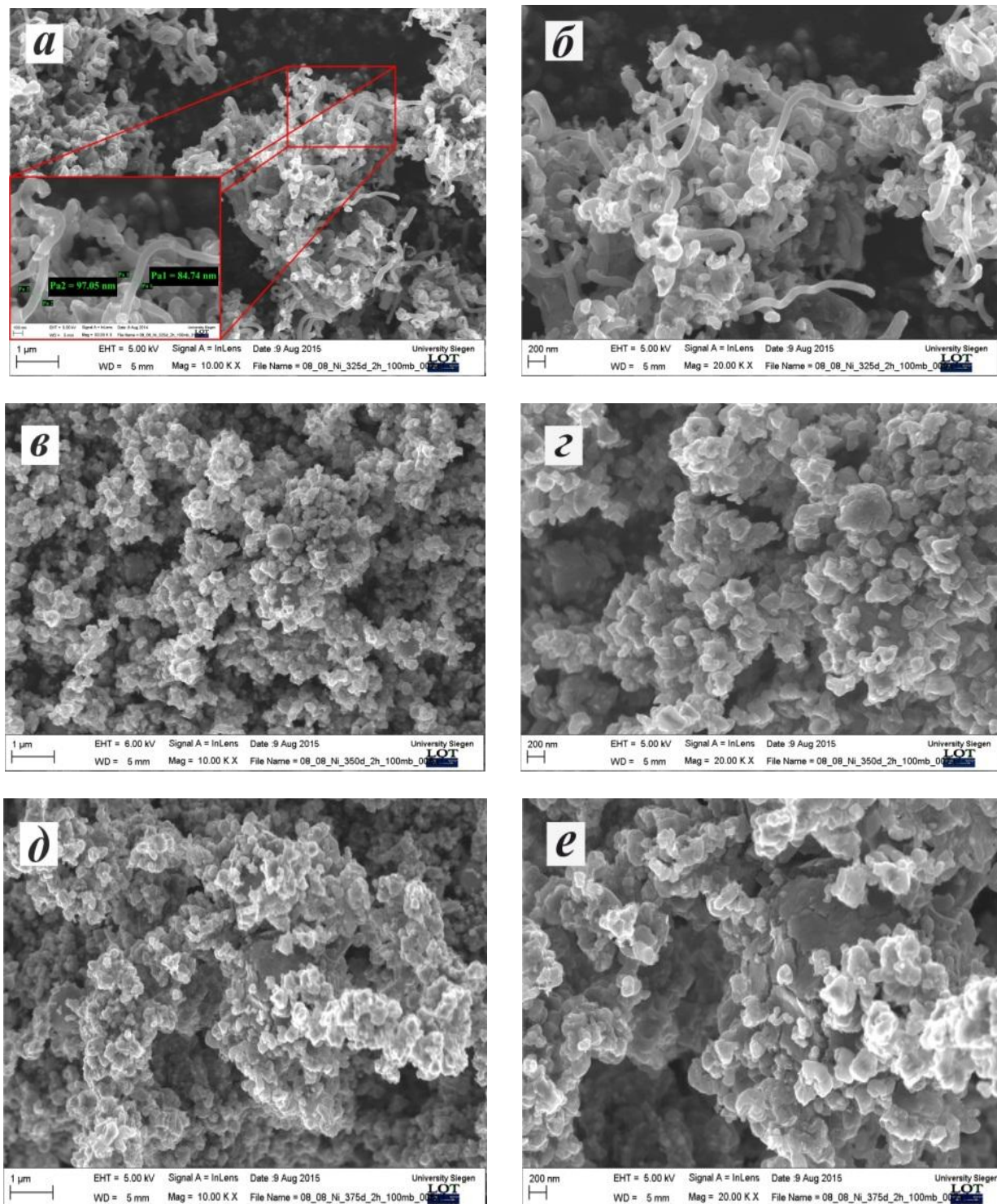
В отличие от давления 100 мбар при 200 мбар стабильный рост УНС происходит и при температуре 350°C. При 375°C наблюдается зауглероживание кластеров металла (рисунок 3 д, е), однако присутствуют короткие (до 300 нм) УНС больших диаметров (100–200 нм).

На рисунке 4 показаны СЭМ-изображения УНС полученных при давлении 300 мбар.

Результаты экспериментов при давлении 300 мбар оказались аналогичны предыдущим для 200 мбар и стабильный рост УНС происходил при температурах 325 и 350°C. При температуре 375°C наблюдается зауглероживание кластеров металла и присутствие коротких УНС с большим диаметром.

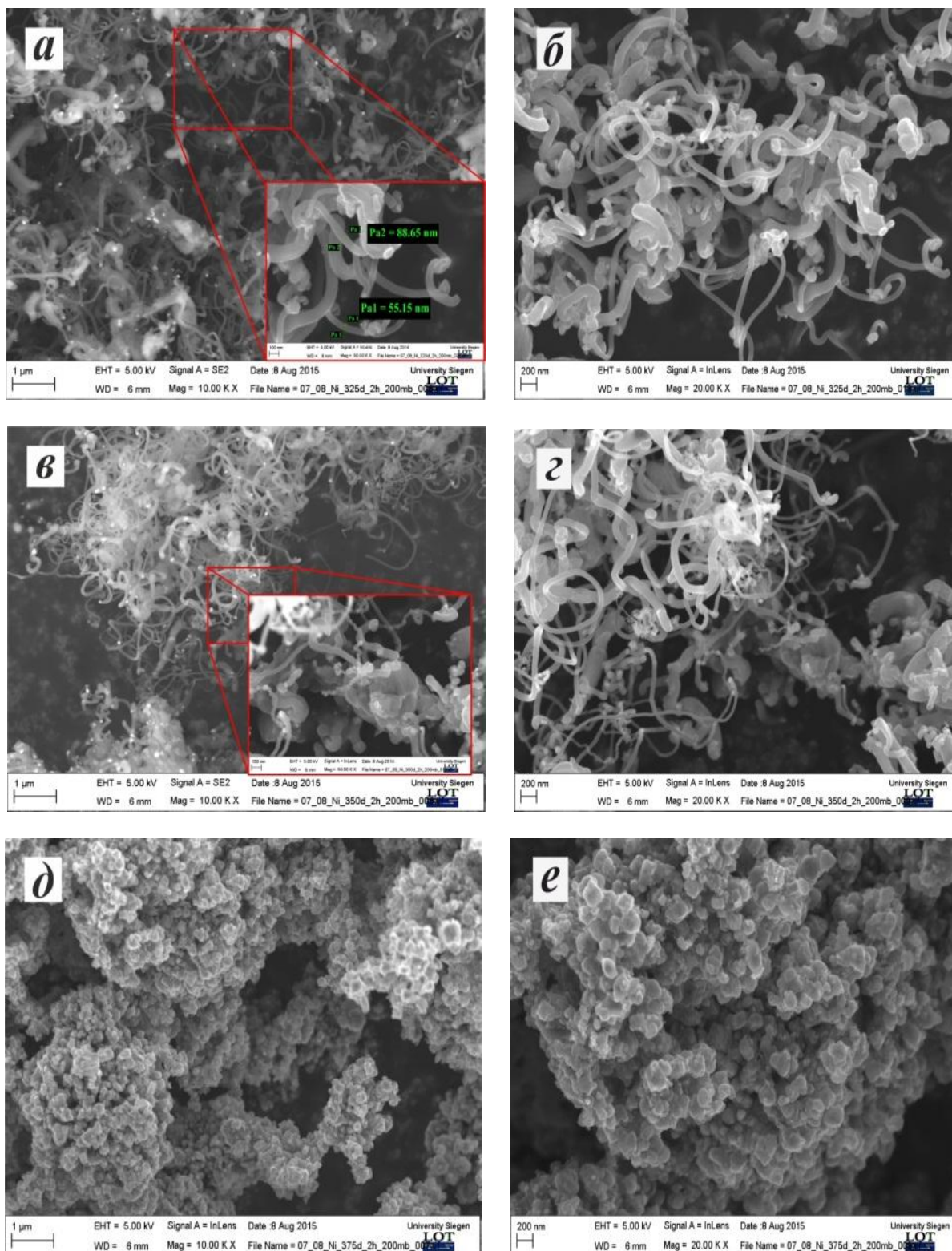
Таким образом СЭМ-исследования показали, что существует диапазон температур и давлений (325–375°C, 100–300 мбар), при котором происходит низкотемпературный синтез УНС из газовой фазы.

Результаты экспериментов наглядно указывают на существование температурного диапазона между низкотемпературным и высокотемпературным (стандартным) режимами синтеза, в котором не происходит рост УНС.



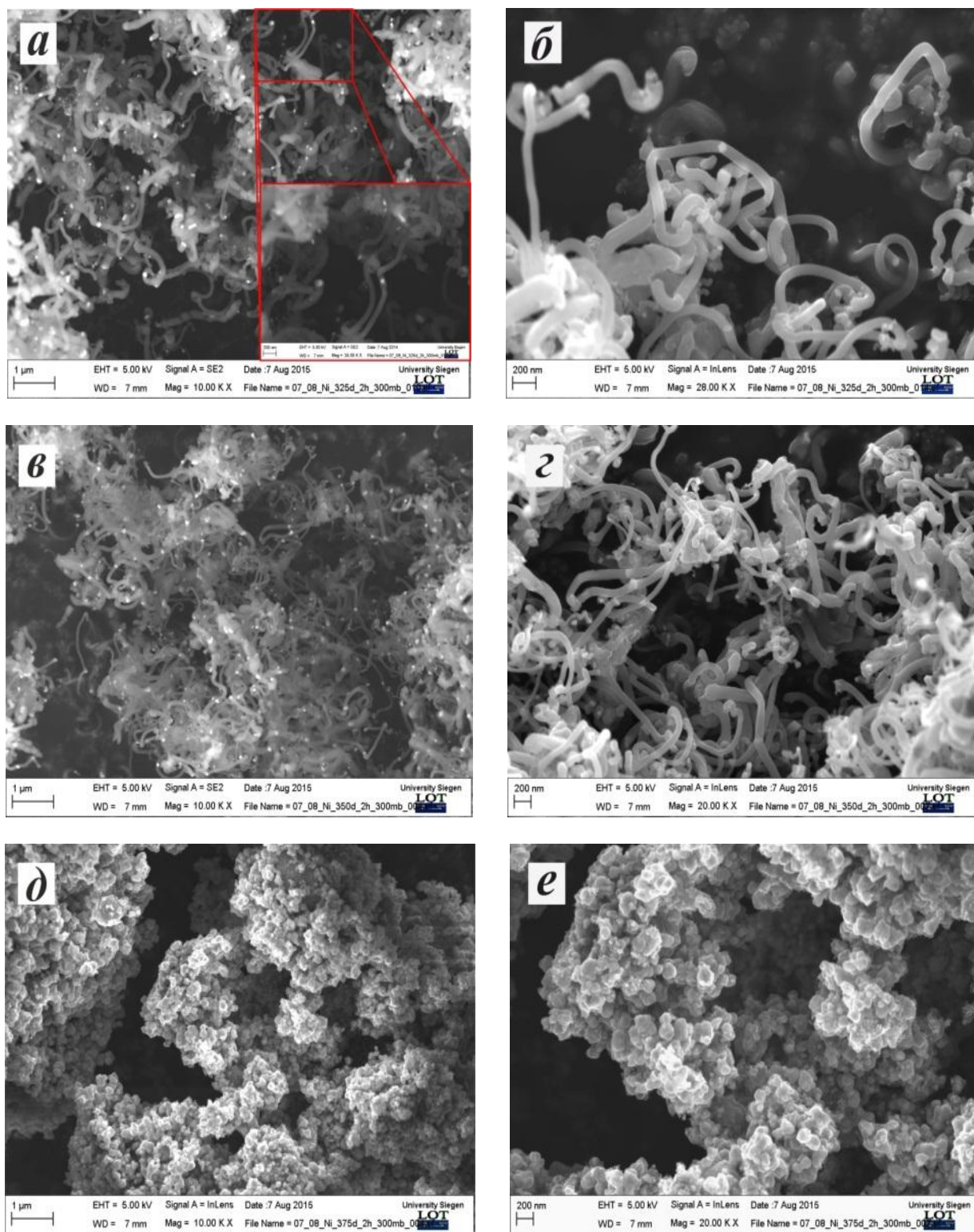
a, б – 325°C; *в, г* – 350°C; *д, e* – 375°C

Рис. 2 – СЭМ-изображения УНС на ЭВП НП никеля (давление 100 мбар) при разных увеличениях



$a, b - 325^{\circ}\text{C}$; $c, d - 350^{\circ}\text{C}$; $e, f - 375^{\circ}\text{C}$

Рис. 3 – СЭМ-изображения УНТ (давление 200 мбар) и их фрагменты



a, б – 325°C; *в, г* – 350°C; *д, e* – 375°C

Рис. 4 – СЭМ-изображения УНС (давление 300 мбар)

Результаты КРС

На рисунке 5 показаны спектры КРС

УНС, полученных при разных значениях температуры и давлений.

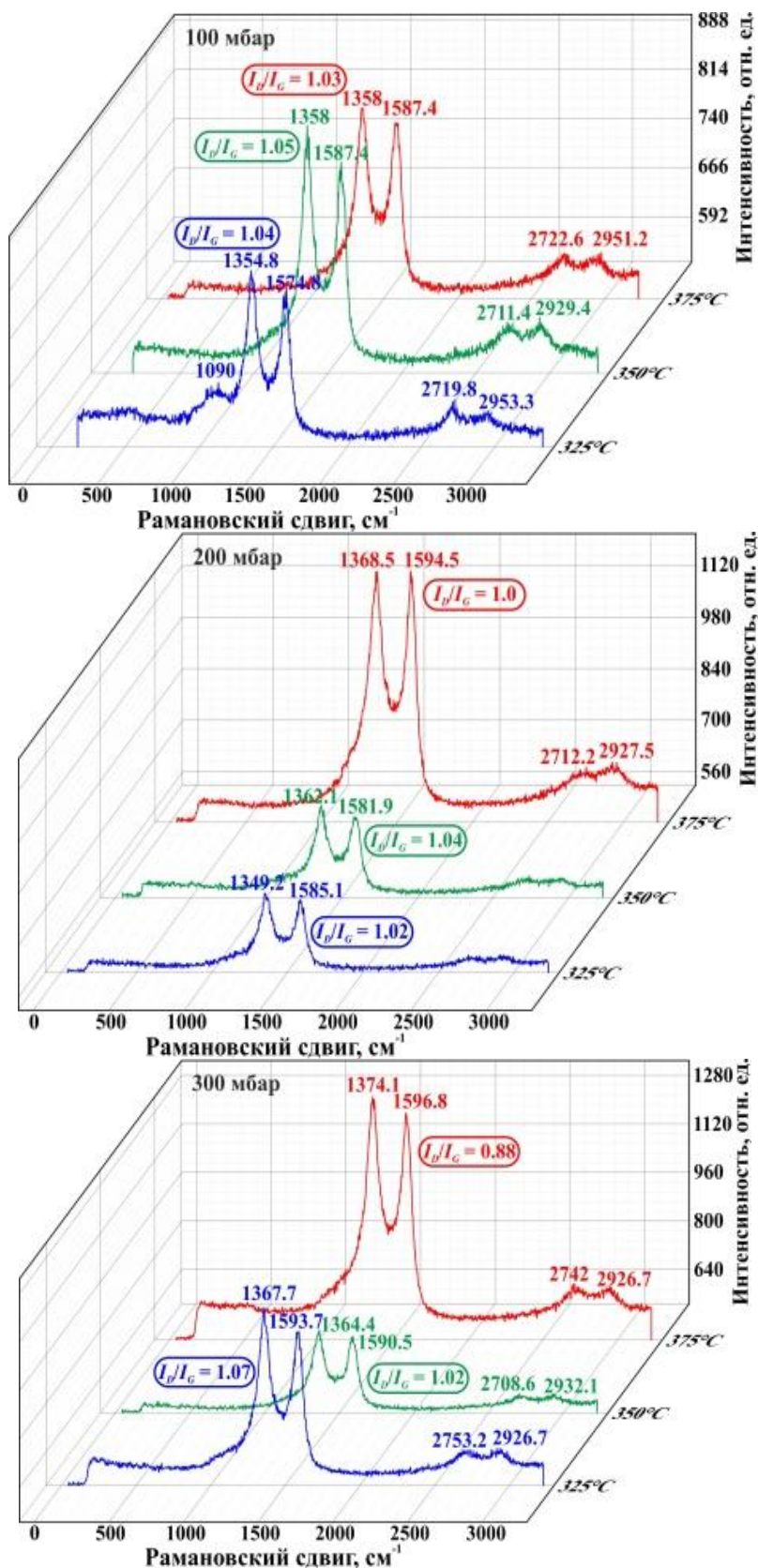


Рис. 5 – Спектры КРС УНС на НП Ni

Все спектры образцов, полученных при температуре синтеза 325°C преимущественно показывают две группы первого порядка *D* и *G*. Эти группы расположились в диапазоне 1349.2-1367.7 см⁻¹ и 1574.8-1593.7 см⁻¹, соответственно.

Но интенсивность *D* пика немного выше, чем у пика *G*, что говорит о присутствии неупорядоченности. Этот пик часто называют пиком неупорядоченности или пиком дефектов, и его интенсивность относительно пика *G* часто используется для оценки качества нанотрубок [12].

Также наблюдается гармоника второго порядка *2D* в области 2719.8-2753.7 см⁻¹, которая является обертоном *D* группы [13]. Эта группа является индикатором наличия дальнего порядка в образце и появляется из-за двухфононного вторичного рассеяния, что приводит к образованию неупругих фононов [14]. Она может ассоциироваться со степенью кристалличности углеродных нанотрубок [15]. Интенсивность этих пиков сильно зависит от металлических свойств нанотрубки [16].

Также можно заметить пики малой интенсивности в области 2926.7-2953.3 см⁻¹, которые по своему расположению соответствуют моде *D + G* (сумма частот двух зон: *D* и *G*), которая также является следствием неупорядоченности.

Эта мода обычно появляется у графена, но ее присутствие в спектрах образцов объясняется тем, что нанотрубки это свернутые листы графена и проявление этого пика вполне вероятно [17].

Кроме того, в первом образце наблюдается достаточно размытый пик в пределах 1090 см⁻¹, который может быть отнесен к оксиду никеля, так как УНС выращивались на НП этого металла и его расположение соответствует 2LO моде оксида никеля [18].

В спектрах образцов полученных при температуре 350°C пик *D* смещен в высокочастотную область 1358-1364.4 см⁻¹, что говорит о возрастающей неупорядоченности. Группа *G* наблюдается в областях 1581.9-1590.5 см⁻¹.

Группа *2D* находится в пределах 2708.6-2711.4 см⁻¹, что не сильно отличается от расположения этого же пика в спектрах образцов, синтезированных при температуре 325°C. Моде *D + G* наблюдается в области 2929.4-2932.1

см⁻¹. Можно говорить о том, что при увеличении температуры на 25°C наблюдается только небольшое смещение *D* пика.

Для образцов, полученных при температуре 375°C наблюдается небольшое смещение всех пиков, кроме моды *D + G*. Группы *D* и *G* находятся в области 1358-1374.1 см⁻¹ и 1587-1596.8 см⁻¹, соответственно. Группа *2D* у образца, синтезированного при давлении 300 мбар смещена в область 2740 см⁻¹.

Согласно [19] смещения в спектрах КРС различных углеродных материалов могут наблюдаться из-за особенностей структуры, *sp*² конфигураций, длины и угла связи, соотношения *sp*²/*sp*³, неупорядоченной структурой материала и его содержания.

Отношение интенсивностей групп *D* и *G* дает возможность оценить наличие дефектов и чистоту нанотрубок, то есть напрямую делать выводы об их качестве [20, 21].

Эти величины (*I_D/I_G*, рис. 5) были рассмотрены для всех образцов. Так можно сказать, что наиболее высокую кристалличность имеют нанотрубки, выращенные при 325°C и 300 мбар.

Исследование УНС методом рентгеноструктурного анализа

На рисунке 6 представлены рентгенограммы синтезированных УНС.

На дифрактограммах всех образцов присутствует наиболее характерное для графита отражение от плоскости (002) ($2\theta \approx 26.38^\circ$, PDF # 41-1487).

Также наблюдается увеличение интенсивности графитового пика с уменьшением температуры. Наиболее интенсивный пик, характерный для углеродных нанотрубок наблюдается для образца, полученного при температуре синтеза – 325°C и давлении – 300 мбар. Это хорошо согласуется с результатами спектроскопии КРС, приведённых выше.

Исследования УНС на ЭВП НП Ni методом ПЭМ

На основании исследований СЭМ-изображений, спектров КРС и рентгеноструктурного анализа образцы, синтезированные при давлении 300 мбар и температуре 325°C были дополнительно изучены методом ПЭМ.

На рисунке 7 показаны ПЭМ-изображения этих образцов.

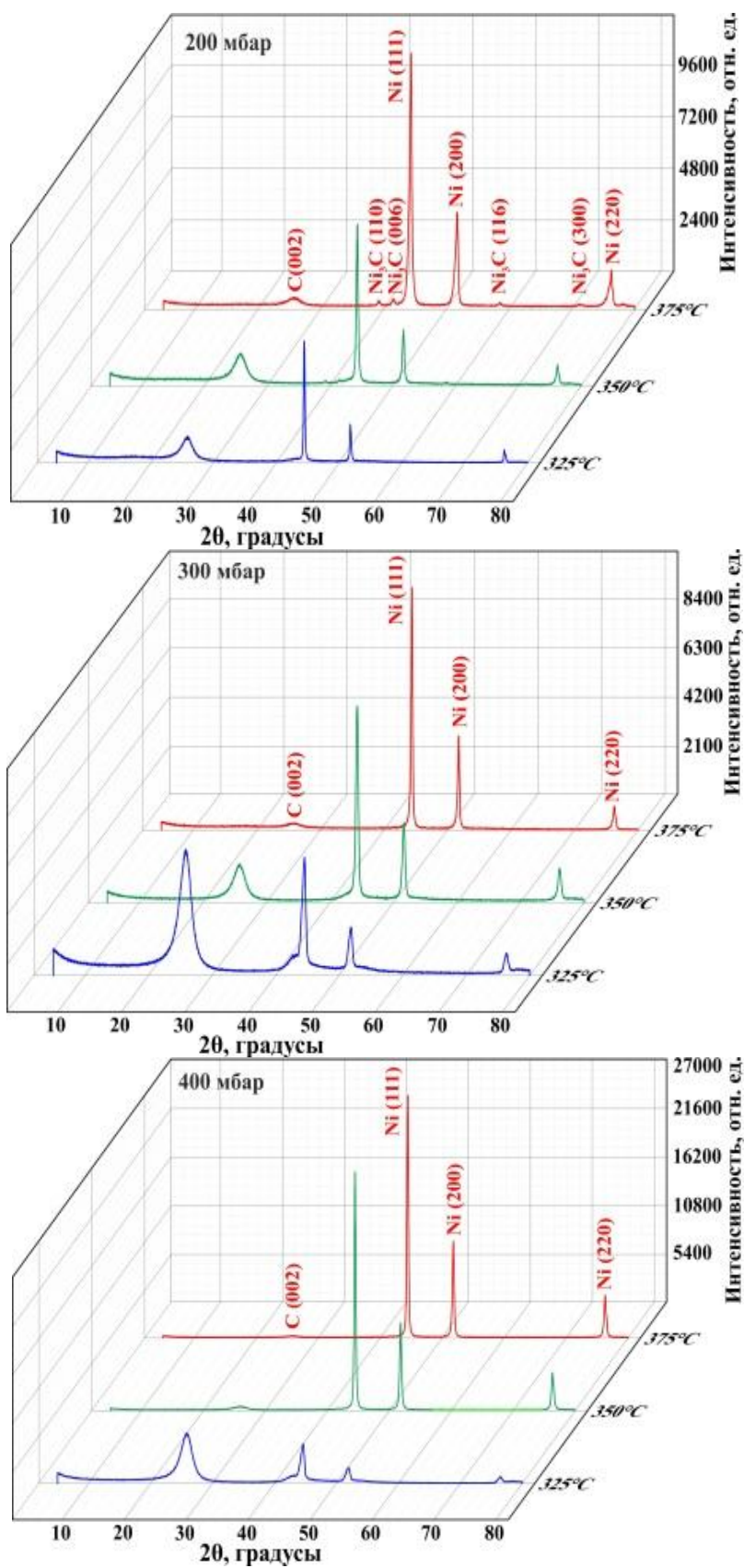


Рис. 6 – Рентгенограммы УНС на НП Ni

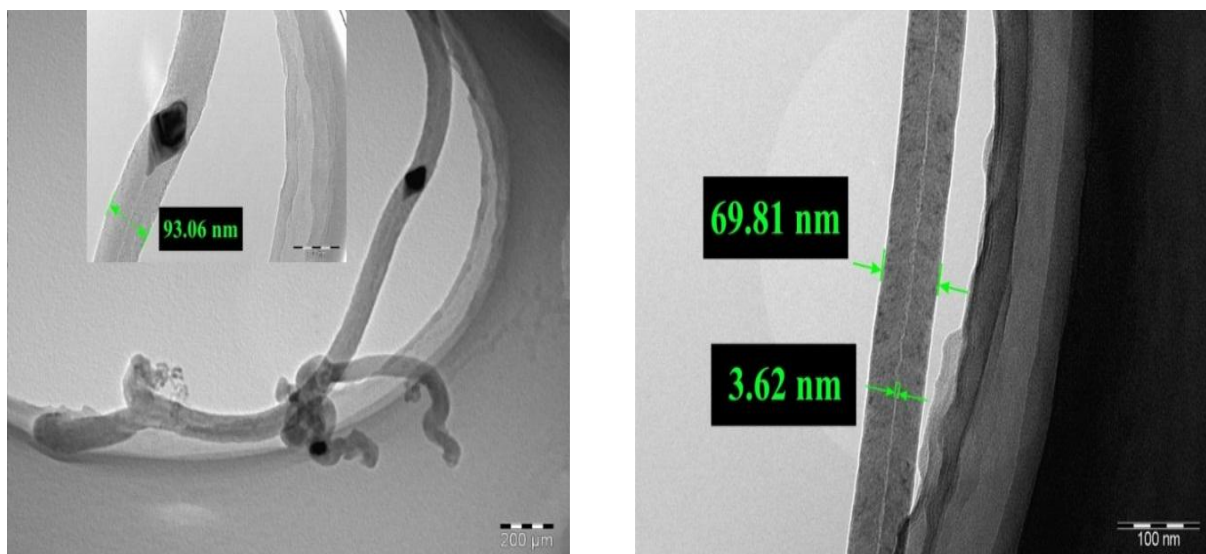


Рис. 7 – ПЭМ-изображения УНС на НП Ni

Как видно на ПЭМ-изображениях, образующиеся УНС являются многостенными нанотрубками с кластерами металла внутри канала трубки. Это хорошо согласуется с результатами рентгеноструктурного анализа и спектроскопии КРС. При этом диаметр канала очень узкий (3.62 нм). Из рисунка 7 видно, что УНТ обволакивает нанокристалл Ni. Расположение кластера никеля позволяет говорить о смешанном механизме роста УНТ. Очевидно, что диффузия углерода проходит не только через объём кластера, но и по поверхности.

Заключение

В результате проведенных экспериментов была показана возможность использования НП никеля, полученных методом ЭВП в качестве катализаторов при выращивании УНС. Стабильный рост УНС осуществлялся при температурах, значительно ниже обычно используемых при термическом ХОГФ. Эксперименты показали, что нижней температурной границей является 325°C. При этой же температуре происходит массовый рост УНС во всем исследуемом интервале давлений. СЭМ-исследования наглядно указывают на существование температурного диапазона между низкотемпературным и высокотемпературным (стандартным) режимами синтеза в котором не происходит рост УНС.

Спектроскопия КРС показала, что по отношению интенсивностей групп D и G, наиболее высокую кристалличность имеют наност-

руктуры, выращенные на НП при 325°C и 300 мбар. Эти выводы согласуются с результатами рентгеноструктурного анализа. Результаты ПЭМ подтвердили, что образующиеся УНС являются многостенными нанотрубками с кластерами металла внутри канала.

Полученные в ходе проведения исследований результаты обладают высоким потенциалом для разработки эффективной, энергетически выгодной, недорогой технологии получения УНТ и УНВ, без использования дорогостоящих газов и возможностью регулирования структурой и свойствами УНС макроскопическими параметрами. Синтезированные УНТ не обладают высокими кристаллофизическими свойствами (степень кристалличности, геометрическая направленность и др.). Однако в областях промышленности, где не требуется структурное совершенство (таких как: армирующий компонент в бетоне, полимерах, пластиках, керамике и др. материалах; основы для активных сорбентов; в композиционных материалах при изготовлении медицинских протезов) применение таких УНС является перспективным.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Комитета Науки МОН РК №3823/ГФ4.

Литература

1. Krueger A. Carbon Materials and Nanotechnology. – 2010. WILEY-VCH Verlag

GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 475 p.

2. Радущевич Л.В., Лукьянович В.М. О структуре углерода, образующегося при термическом разложении окиси углерода на железном контакте // Журнал физической химии. – 1952. – Т. 26. – С. 88-95.

3. Xia J. H, Jiang X. and Jia C. L. The size effect of catalyst on the growth of helical carbon nanofibers // Applied Physics Letters. – 2009. – Vol. 95. – P. 223110-1-223110-3.

4. Merchan-Merchan W., Saveliev A. V., Kennedy L., Jimenez W. C. Combustion synthesis of carbon nanotubes and related nanostructures // Progress in Energy and Combustion Science. – 2010. – Vol. 36. – P. 696-727.

5. Сабитов С., Кошанова А., Медянова Б.С., Партизан Г., Мансуров Б.З., Алиев Б.А. Синтез углеродных наноструктур на никелевых пленках методом кислородно-ацетиленовой горелки // Горение и плазмохимия. – 2015. – Т.13, №1. С. 47-52.

6. Буранова Ю.С. Физика, электроника, нанотехнологии // Труды МФТИ. – 2011. – Том 3. – № 3. – С. 30-41.

7. Лернер М.И., Сваровская Н.В., Псахье С.Г., Бакина О.В. Технология получения, характеристики и некоторые области применения электровзрывных нанопорошков металлов // Российские нанотехнологии. – 2009. – Том 4. – №11-12. – С. 56-68.

8. Pakdee U., Srabua S., Phongphala A., Pawong C. Effects of Catalyst on Carbon Nanotubes Synthesized by Thermal Chemical Vapor Deposition Method // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 804. – P. 47-50.

9. Haroon Ur Rashid, Kaichao Yu, Muhammad Naveed Umar, Muhammad Naveed Anjum, Khalid Khan, Nasir Ahmad and Muhammad Tariq Jan. Catalyst role in chemical vapor deposition (cvd) process: a review // Rev.Adv.Mater.Sci. – 2015. – Vol. 40. – P. 235-248.

10. Partizan G., Mansurov B.Z., Medyanova B.S., Aliev B.A., Xin Jiang. Synthesis of carbon nanostructures by thermal CVD on nickel nanoparticles // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – Vol. 88. – No. 6. – P. 1451-1458.

11. Partizan G., Mansurov B.Z., Medyanova B.S., Koshanova A.B., Aliyev B.A., Xin Jiang. Synthesis of carbon nanostructures on iron nanopowders obtained by electric explosion of conductors // Eurasian Chemical-technological

Journal. – 2015. – Vol. 17. – P.200-207.

12. Joe Hodkiewicz. Characterizing Carbon Materials with Raman Spectroscopy // Thermo Fisher Scientific. – 2010. Application Note: 51901

13. Bokobza L., Zhang J. Raman spectroscopic characterization of multiwall carbon nanotubes and of composites // eXPRESS Polymer Letters. – 2012. – Vol.6, No.7. – P. 601–608.

14. Lehman J. H., Terrones M., Mansfield E., Hurst K. E., Meunier V. Evaluating the characteristics of multiwall carbon nanotubes // Carbon. – 2011. – Vol. 49. – P. 2581–2602.

15. Syazwan Afif Mohd Zobir, Suriani Abu Bakar, Saifollah Abdullah, Zulkarnain Zainal, Siti Halimah Sarijo, and Mohamad Rusop. Raman Spectroscopic Study of Carbon Nanotubes Prepared Using Fe/ZnO-Palm Olein-Chemical Vapour Deposition // Journal of Nanomaterials. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1-6.

16. Kim K.K., Park J.S., Kim S.J., Geng H.Z., An K.H., Yang C-M, et al. Dependence of Raman spectra G' band intensity on metallicity of single-wall carbon nanotubes // Phys Rev B. – 2007. – Vol. 76, No. 20. – P. 205426-1–8.

17. Zheng Yan, Andrew R. Barron. Characterization of graphene by Raman spectroscopy // Режим доступа: <http://cnx.org/content/m34667/1.2/> - 29 June, 2010.

18. Mironova-Ulmane N., Kuzmin A., Steins I., Grabis J., Sildos I., Pars M. Raman scattering in nanosized nickel oxide NiO // Journal of Physics: Conference series. – 2007. – Vol. 93. – P. 012039 – 1-5.

19. Ferrari A. C., Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond. // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. – 2004. – Vol. 362. – P. 2477–2512.

20. Bo Zeng, Min Gao, Shenghua Liu, Taisong Pan, Zhenlong Huang, and Yuan Lin. Thermal chemical vapor deposition of layered aligned carbon-nanotube films separated by graphite layers // Phys. Status Solidi A. – 2013. – Vol. 210, No. 6. – P. 1128-1132.

21. Costa S., Borowiak-Palen E., Kruszyńska M., Bachmatiuk A., Kaleńczuk R. J. Characterization of carbon nanotubes by Raman spectroscopy // Materials Science-Poland. – 2008. – Vol. 26, No. 2. – P. 1-9.

STRUCTURE AND MORPHOLOGY OF CNTs SYNTHESIZED ON Ni NANOPOWDERS

^{1,2}G. Partizan, ¹B.Z. Mansurov, ^{1,2}B.S. Medyanova, ^{1,2}A.B. Koshanova, ²B.A. Aliyev, ³Xin Jiang

¹The Institute of Combustion Problems, 050012, Bogenbay batyr str., 172, Almaty, Kazakhstan

²al-Farabi Kazakh National University, 050040, al-Farabi ave., 71, Almaty, Kazakhstan.

³Institute of Materials Engineering, University of Siegen, Paul-Bonatz-Straße 9-11, 57076, Siegen, Germany

E-mail: gulmira.partizan@gmail.com

Abstract

The article presents the results of experiments on the synthesis of carbon nanostructures by thermal chemical vapor deposition using a nickel nanopowders obtained by electric explosion of wires as catalysts. The optimal parameters for low-temperature growth of carbon nanotubes was identify during the experiments. SEM studies revealed the existence of a range of temperatures and pressures between the low- and high-temperature synthesis regimes in which there is no growth of carbon nanostructures. The results of Raman spectroscopy and X-ray analysis showed that the most high crystallinity have samples grown at a lower temperature limit, determined in the course of the experiments. Studies by transmission electron microscopy indicate that the synthesized structures are multi-walled carbon nanotubes with metal clusters in the channel of a tube.

Keywords: thermal chemical vapor deposition, carbon nanostructures, metal nanopowders, copper film, multi-walled carbon nanotubes.

NI НАНОУНТАҒЫНДА СИНТЕЗДЕЛГЕН КНТ-НІҢ ҚҰРЫЛЫМЫ ЖӘНЕ МОРФОЛОГИЯСЫ

^{1,2}Г. Партизан, ¹Б.З. Мансуров, ^{1,2}Б.С. Медянова, ^{1,2}А.Б. Кошанова, ²Б.А. Алиев, ³Xin Jiang

¹Жану проблемалары институты, 050012, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы, Қазақстан

²әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, 050040, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

³Institute of Materials Engineering, University of Siegen, Paul-Bonatz-Straße 9-11, 57076, Siegen, Germany

E-mail: gulmira.partizan@gmail.com

Аннотация

Мақалада электрлік жарылыс әдісімен алынған никель наноұнтағы катализатор ретінде газдық фазада термиялық-химиялық отырғызу әдісімен синтезделген көміртекті наноқұрылымның тәжірибелер нәтижелері көрсетілген. Тәжірибе барысында көміртекті нанотүтікшелерінің төменгі температурада өсу процесінің оптималды технологиялық параметрлері анықталды. СЭМ-зерттеуі кезінде температура мен қысымның наноқұрылымдардың өсуі жүрмейтін төмен- және жоғары температуралық режим аралығындағы диапазоны айқындалды. Жарықтың комбинациялық шашырау және рентгенқұрылымдық талдау әдістерінің нәтижесі тәжірибелер барысында анықталған төменгі температура кезіндегі өсірілген үлгілер жоғары кристалдық құрылымға ие екенін көрсетті. Жарықтандырушы электрондық микроскоп әдісі синтезделген құрылымдардың түтікше каналындағы металл кластерлері бар көпқабатты көміртекті наноқұрылым екені көрсетті.

Түйінді сөздер: термиялық химиялық отырғызу, көміртекті наноқұрылымдар, металл наноұнтақтары, мыс қабыршағы, көпқабатты көміртекті нанотүтікшелер.