

УДК 538.975, 66.017

Г. Партизан^{1,2}, Б. З. Мансуров¹, Б. С. Медянова^{1,2}, А. Б. Кошанова^{1,2}
М. Е. Мансурова², Б. А. Алиев², Xin Jiang³

¹ Институт проблем горения АН РК
ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, 050012, Казахстан

² Казахский национальный университет им. аль-Фараби
пр. аль-Фараби, 71, Алматы, 050040, Казахстан

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

gulmira.partizan@gmail.com, mansurov_batyr@mail.ru, bota2192@mail.ru, aijan_93@list.ru
mansurova01@mail.ru, Bahodir.Aliev@kaznu.kz, jiang@lot.mb.uni-siegen.de

СТРУКТУРА И МОРФОЛОГИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОВОЛОКОН, СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА НАНОПОРОШКАХ МЕДИ*

Представлены результаты экспериментов по синтезу углеродных нановолокон методом термического химического осаждения из газовой фазы с использованием нанопорошков меди, полученных методом электрического взрыва проводников в качестве катализаторов. Стабильный рост углеродных нановолокон осуществлялся при температурах значительно ниже обычно используемых. В ходе проведенных экспериментов были определены технологические параметры, оптимальные для низкотемпературного роста углеродных нановолокон. Синтезированные образцы имеют различный диаметр и морфологию (от спиралевидных до разветвленных и прямых). Кластеры меди находятся как на концах, так и внутри волокон. Результаты ИК спектроскопии указывают на то, что структура выращенных углеродных нановолокон носит полимерный характер. Рентгеноструктурный анализ показал присутствие на дифрактограммах гало при малых значениях угла 2θ , которое доказывает, что выращенные структуры имеют аморфную природу. Во всех спектрах комбинационного рассеяния света отсутствуют группы, отвечающие за дальний порядок. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии показали, что наноструктуры не обладают внутренним каналом и представляют собой сплошные нановолокна.

Ключевые слова: термическое химическое осаждение, углеродные наноструктуры, нанопорошок меди, низкотемпературный синтез, углеродные нановолокна.

Введение

С момента своего открытия углеродные нанотрубки (УНТ) стали объектом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований. Целью этих изысканий были поиск оптимальных условий получения и анализ их уникальных механических, химических и электрических свойств. Официально принято считать, что УНТ впервые были обнаружены в 1991 г. в саже, которая образовывалась на электродах в условиях дугового разряда [1]. Однако о существовании УНТ советские ученые Л. В. Радужкевич и В. М. Лукьянович сообщали еще в 1952 г. [2]. Эти работы не привлекли широкого внимания научного сообщества в связи с их публикацией только на русском языке.

Официально принято считать, что УНТ впервые были обнаружены в 1991 г. в саже, которая образовывалась на электродах в условиях дугового разряда [1]. Однако о существовании УНТ советские ученые Л. В. Радужкевич и В. М. Лукьянович сообщали еще в 1952 г. [2]. Эти работы не привлекли широкого внимания научного сообщества в связи с их публикацией только на русском языке.

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

Партизан Г., Мансуров Б. З., Медянова Б. С., Кошанова А. Б., Мансурова М. Е., Алиев Б. А., Xin Jiang. Структура и морфология углеродных нановолокон, синтезированных на нанопорошках меди // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 3. С. 62–71.

За последние два десятилетия были разработаны такие методы получения углеродных наноструктур (УНС), как различные виды химического осаждения из газовой фазы (в ВЧ и СВЧ разряде, плазме на постоянном токе), а также метод горячей нити, синтез в пламени углеводородов и дуговом разряде [1; 3–5]. Несмотря на то что эти методы достигли результатов высокого уровня, они все еще далеки до полного контроля над важными структурными свойствами, такими как длина нанотрубок, их диаметр и хиральность [6].

Широко применяемый в настоящее время метод синтеза УНС основан на использовании процесса разложения газообразных углеводородов в присутствии катализаторов. В качестве катализаторов чаще всего используются частицы металлов подгруппы железа (Co, Ni и Fe) размером несколько десятков нанометров [1]. Как правило, при использовании этих металлов синтез проводится при высоких температурах (700–1200 °С) и давлениях ниже атмосферного.

В настоящее время применяется несколько методик подготовки металлических нанокластеров для синтеза УНС. Одним из перспективных методов получения нанопорошков (НП), не требующим длительной и сложной процедуры синтеза, 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: они устойчивы к окислению и спеканию при комнатной температуре, при нагревании характеризуются высокой химической и диффузионной активностью [7].

В методике термического химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) при использовании медных катализаторов, как правило, эксперименты проводятся при высоких температурах (600–900 °С). 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 УНС на ЭВП НП меди, а также оптимальных условий низкотемпе-

ратурного (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 УНС. Процедура получения НП, детали экспериментов, а также результаты исследования их морфологии и структуры подробно описаны в работах [10–12]. В Отделе поверхности и технологий новых материалов Института материаловедения Университета г. Зиген (Германия) (Institute of Materials Engineering, University of Siegen, Germany) были проведены совместные исследования структуры и морфологии ЭВП НП, их каталитической активности и возможности синтеза на них УНС методом термического ХОГФ [12; 13].

Синтез УНС

Рост УНС происходил в объеме кварцевого реактора с внутренним диаметром 90 мм, помещенного 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 мин (до давления 10^{-2} бар). Далее реактор нагревался до необходимой температуры с контролируемой скоростью (скорость нагрева варьировалась от 5 до 10 °С/мин). После достижения заданной температуры в реактор подавался рабочий газ – ацетилен – до необходимого значения давления. По окончании синтеза (время экспериментов от 1 до 3 ч) производилась откачка остаточных газов и охлаждение реактора до комнатной температуры также с заданной скоростью. Схема установки и процедура проведения синтеза УНС детально описаны в [14–15].

Методики и аппаратура для изучения морфологии и структуры УНС

Для изучения морфологии образцов использовался автоэмиссионный сканирую-

щий электронный микроскоп (СЭМ) сверхвысокого разрешения фирмы «Zeiss» модели GemiCu Ultra 55 вместе с устройством для рентгеноспектрального микроанализа исследуемого образца в микроскопе фирмы «Thermo Scientific». Для исследований были выбраны два основных режима съёмки – InLens и SE2. InLens-метод позволяет получить СЭМ-изображения морфологии поверхности сканируемого образца или его торцевого среза с наилучшим разрешением. Режим съёмки SE2 является наиболее предпочтительным для получения точных характеристик о рельефе поверхности сканируемого образца. Исследования были выполнены в Институте материаловедения Университета г. Зиген (Германия).

Исследования методом инфракрасной (ИК) спектроскопии проводилось в лаборатории физико-химических исследований химического факультета КазНУ с помощью спектрометра Spectrum 65 FT-IR Spectrometer (в режиме пропускания).

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 осуществлялась программой OriginPro 8.1. При проведении фазового анализа использовалась программа PCPDFWIN с базой дифрактометрических данных PDF-2.

В Национальной нанотехнологической лаборатории открытого типа (Алматы, Казах-

стан) 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 (Алматы, Казахстан) с помощью микроскопа JEOL JEM-2100F.

Результаты и обсуждение

Определение температурных границ синтеза УНС на НП Cu

Для определения оптимальных условий низкотемпературного синтеза УНС были проведены эксперименты при различных температурах (200–700 °С) и давлениях (100–500 мбар). Эксперименты показали, что нижняя температурная граница синтеза – 250 °С во всем диапазоне давлений (с шагом 100 мбар). Очевидно, что при более низких температурах не происходит каталитического разложения ацетилена.

На рис. 1 представлены СЭМ-изображения поверхностей НП Cu после проведения синтеза в течение 1-го часа, при давлении 300 мбар, при температурах, близких к нижней и верхней границам синтеза (определенных экспериментально).

При температурах ниже 250 °С и выше 300 °С наблюдался незначительный рост УНС с преобладанием зауглероживания медных кластеров (см. рис. 1). Однако дальнейшие эксперименты показали интересные результаты при температуре синтеза 375 °С и давлении 500 мбар, которые будут приведены ниже.

В результате предварительных экспериментов была показана возможность исполь-

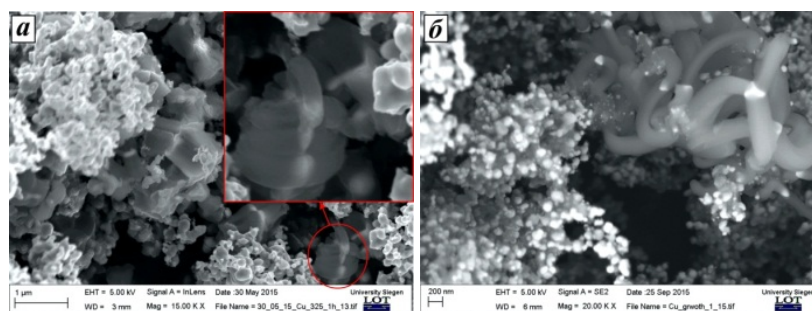


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности НП Cu после проведения синтеза:
а – 225 °С, б – 325 °С

зования НП, полученных методом ЭВП в качестве катализаторов, при выращивании УНС. Также обнаружены нижняя и верхняя температурные границы синтеза во всем диапазоне давлений, при которых происходил устойчивый рост УНС.

СЭМ-исследования морфологии УНС

Для изучения процесса зарождения и роста отдельных УНС дальнейшие, более детальные, исследования проводились на сепарированных кластерах меди. Для проведения сепарации образцы НП суспензировались в растворе гексана. Далее производилась ультразвуковая обработка раствора (объем суспензии 30 мл, частота ультразвука 27 кГц, мощность генератора 120 Вт, воздействие проводилось в течение 30 мин), после чего капли суспензии с частицами металла наносились на кремниевую подложку. Синтез УНС проводился в ранее определенном оптимальном диапазоне экспериментальных параметров (температура 325–375 °С, давление 100–400 мбар). На рис. 2–5 представлены СЭМ-изображения (снятые в режимах съёмки InLens и SE2) с увеличением наиболее интересных фрагментов синтезированных УНС на сепарированных кластерах Cu.

Как видно на СЭМ-изображениях, УНС имеют различные диаметр (50–200 нм) и морфологию (от спиралевидных до разветвленных и прямых). Кластеры меди находятся как на концах УНС, так и внутри. Также были обнаружены разветвленные УНС. На рис. 3–5 приведены СЭМ-изображения 2, 3 и 4-х разветвленных УНС. Подобные симметричные разветвленные УНС наблюдались в диапазонах температур 250–300 °С и давлений 300–500 мбар. Очевидно, что диаметр и форма УНС определяются размерами и симметрией нанокластеров меди.

В ходе выполнения экспериментов были обнаружены режимы, при которых происходит рост сильно протяженных УНС. На рис. 6 представлены СЭМ-изображения образцов с разным разрешением, синтезированных при температуре 375 °С и давлении 500 мбар.

Рост УНС как для нанопорошков, так и для сепарированных образцов, наблюдался

во всем оптимальном экспериментальном интервале.

ИК спектроскопия УНС

Исследование образцов методом ИК спектроскопии проводилось в диапазоне от 500 до 4000 см⁻¹ для определения всех функциональных групп на поверхности полученных углеродных наноструктур. На рис. 7 приведен характерный ИК спектр синтезированных УНС.

Широкий пик в области 3435 см⁻¹ соответствует O–H растяжению гидроксильных групп. Карбоксильные группы могут присутствовать на поверхности УНС из-за частичного окисления. Усиление сигнала в пределах 1004 и 2071 см⁻¹ может происходить из-за C–O растяжения. Пик в области 755 см⁻¹ появляется из-за наличия –CH₂ колебаний. Группы в области 1351, 1381 и 1454 см⁻¹ соответствуют H–C модам растяжения H–C=O в карбоксильных группах, тогда как пик при 1632 см⁻¹ соответствует C=C растяжению углеродных нанотрубок [16]. Результаты ИК спектроскопии говорят о том, что структура выращенных УНС носит полимерный характер.

Рентгеноструктурный анализ УНС

На рис. 8 представлена типичная рентгенограмма синтезированных УНС на НП меди.

Рентгеноструктурный анализ УНС на ЭВП НП Cu показал типичные дифракционные пики металлической меди. На всех рентгенограммах отсутствуют отражения, характерные для графита. При малых значениях угла 2θ присутствует гало, которое указывает на аморфную природу выращенных наноструктур, что подтверждает результаты ИК спектроскопии.

Исследования УНС методом КРС

На рис. 9 представлены спектры КРС УНС на НП Cu, полученных при разных значениях температуры (250–300 °С) и давления (100–400 мбар).

В спектрах КРС образцов, полученных при давлении 100 мбар, все УНС преимущественно показывают пики групп D и G. Можно заметить, что положение пика G

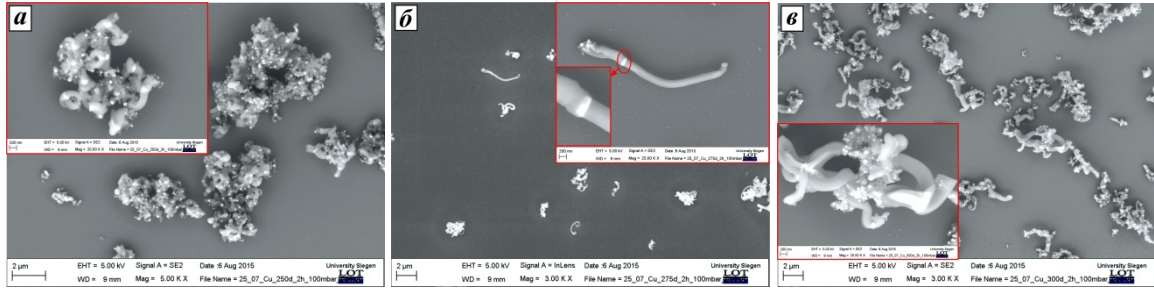


Рис. 2. СЭМ-изображения УНС на НП и кластерах меди, синтезированных при давлении 100 мбар: a – 250 °C; b – 275 °C; c – 300 °C

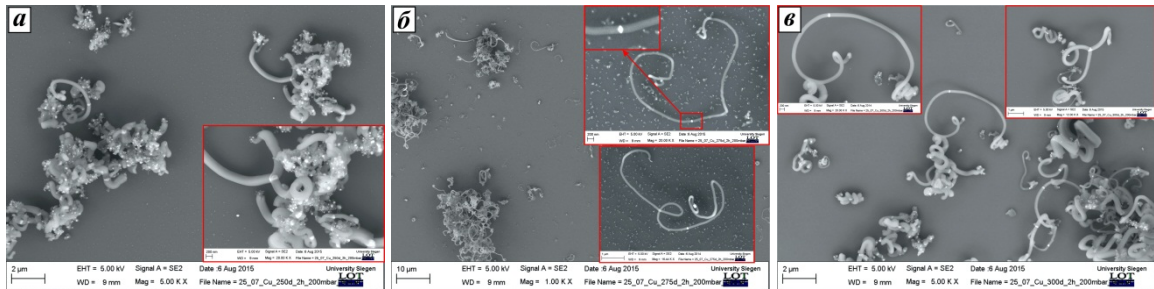


Рис. 3. СЭМ-изображения УНС на НП и кластерах меди синтезированных при давлении 200 мбар: a – 250 °C; b – 275 °C; c – 300 °C

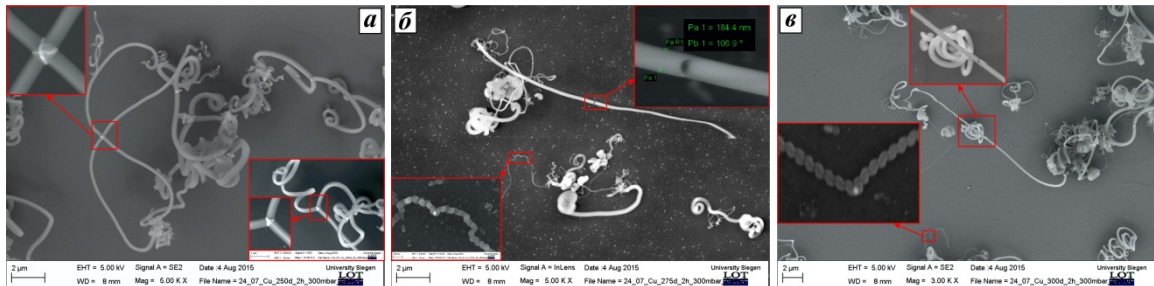


Рис. 4. СЭМ-изображения УНС на НП и кластерах меди синтезированных при давлении 300 мбар: a – 250 °C; b – 275 °C; c – 300 °C

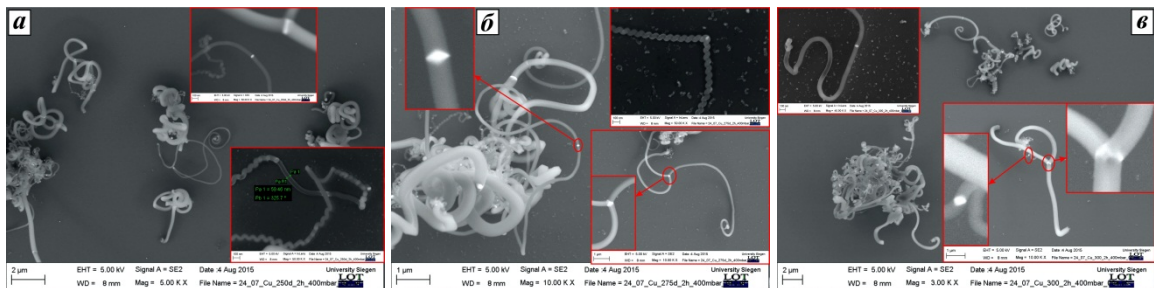


Рис. 5. СЭМ-изображения УНС на НП и кластерах меди синтезированных при давлении 400 мбар: a – 250 °C; b – 275 °C; c – 300 °C

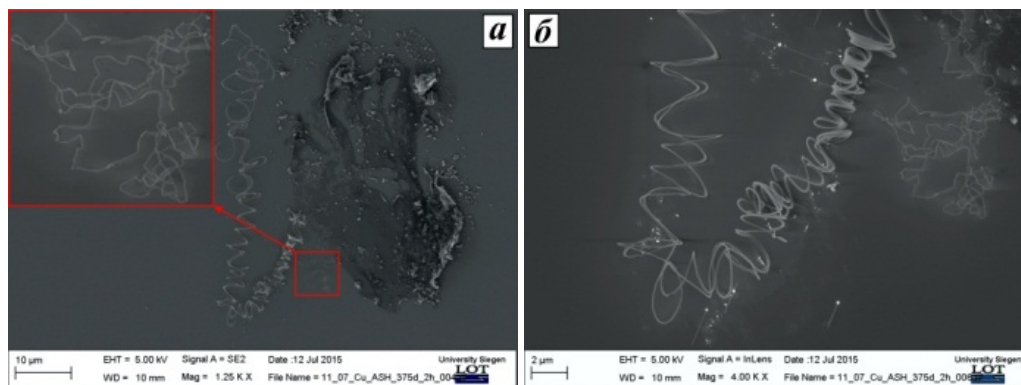


Рис. 6. СЭМ-изображения УНС на сепарированных НП

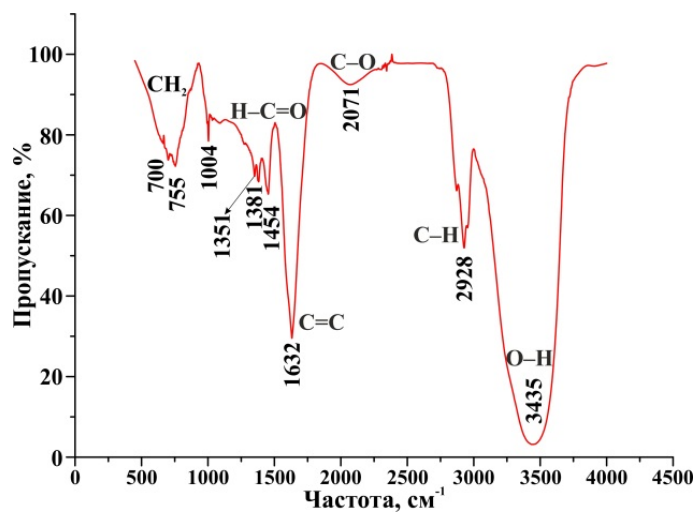


Рис. 7. ИК спектр УНС, синтезированных при давлении 400 мбар и температуре 300 °С

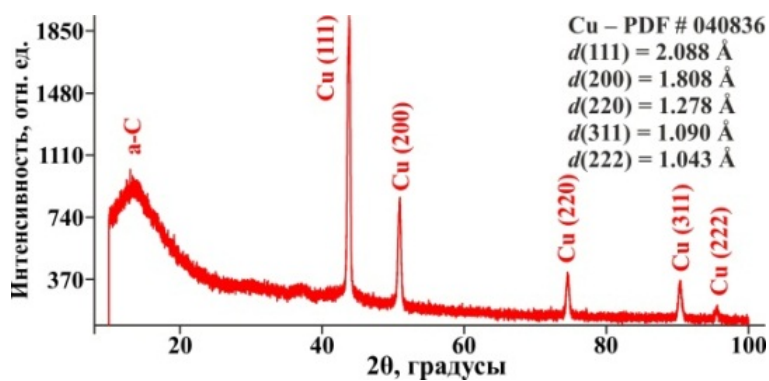


Рис. 8. Рентгенограмма УНС, полученных при температуре 275 °С и давлении 300 мбар

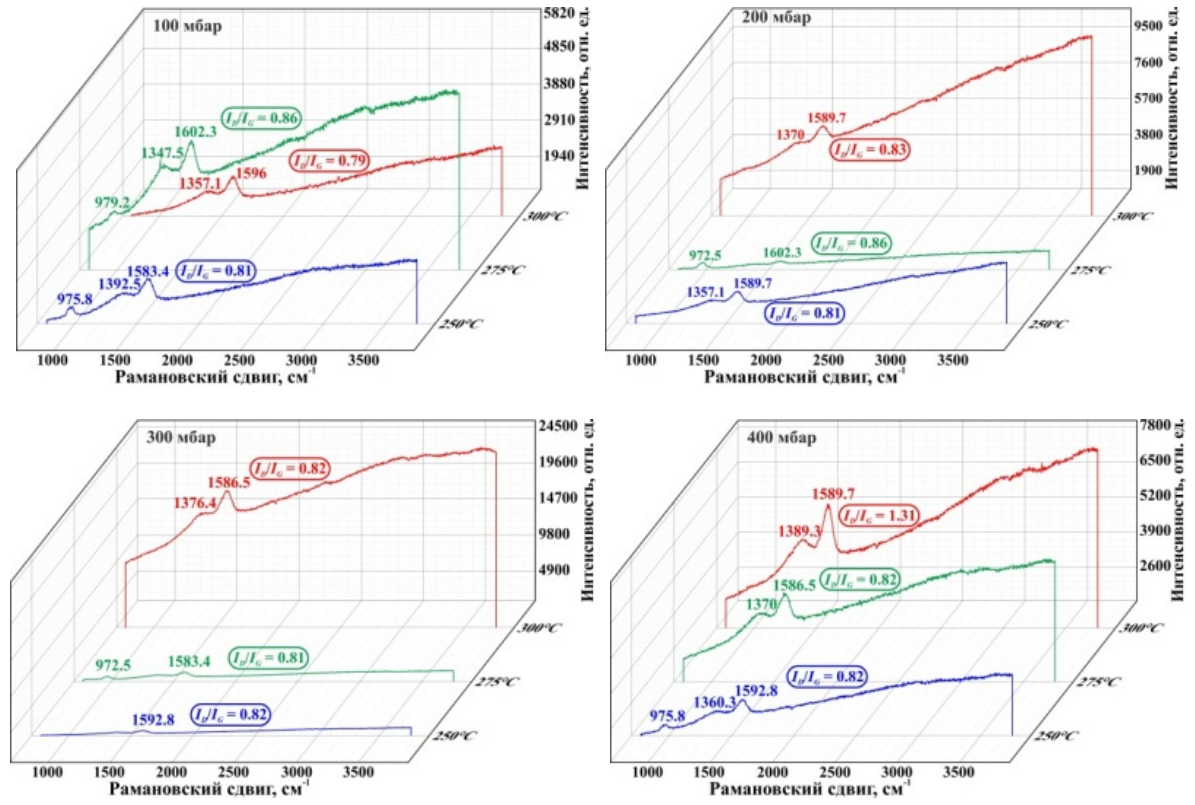


Рис. 9. Спектры КРС УНС на НП Си

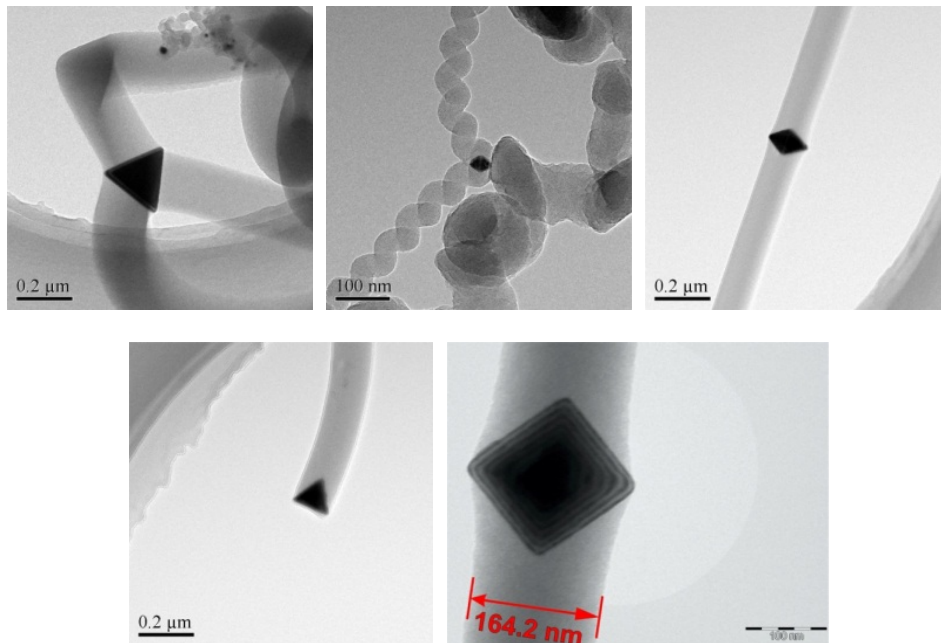


Рис. 10. ПЭМ-изображения синтезированных на сепарированных НП меди УНС

во всех образцах смещено в высокочастотную область, что может быть свидетельством графитизации [17]. Пик D также смещен от 1300 к 1389, 1402 и 1392,5 см^{-1} , но интенсивность этого пика не так высока, что говорит о малой дефектности наноструктур. Во всех спектрах отсутствуют группы, отвечающие за дальний порядок в области 2500–2600 см^{-1} . Основываясь на этом, можно предположить, что образцы обладают аморфной структурой. В спектрах КРС образцов, синтезированных при давлении 200 мбар, наблюдается еще большее смещение пика G . Положение пика меняется от 1590 до 1599 см^{-1} с увеличением температуры. Согласно [17; 18] 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 структуры материала и его содержания. Можно отметить сильное смещение пика D : от 1395 до 1412 см^{-1} . Интенсивность D пика в этих образцах также мала, в третьем образце (300 °С) он проявляется в виде плеча. Это говорит о том, что УНС имеют малое количество дефектов.

У УНС, полученных при давлении 300 мбар, пик D наблюдается в области 1593 и 1587 см^{-1} . Интенсивность больше чем у предыдущих образцов, что указывает на более дефектную структуру. Положение группы G меняется от 1364 до 1383 см^{-1} . Образцы также не показывают кристалличность, так как отсутствует пик дальнего порядка.

В спектрах образцов, синтезированных при давлении 400 мбар, группы D и G находятся в области 1386–1389 и 1590–1593 см^{-1} соответственно. Группа $2D$ не наблюдается в данных образцах.

В целом УНС не сильно отличаются друг от друга по структуре, так как у многих образцов соотношение интенсивностей D и G пиков лежит в диапазоне от 0,81 до 0,86. Судя по ширине и форме пиков, полученные наноструктуры являются нановолокнами (УНВ) с аморфной структурой, что согласуется с результатами ИК спектроскопии и рентгеноструктурного анализа.

Исследования УНС на ЭВП НП Cu методом ПЭМ

На рис. 10 показаны наиболее интересные ПЭМ-изображения синтезированных УНС.

Как видно из рис. 10, синтезированные УНС не обладают внутренним каналом и представляют собой сплошные нановолокна. Таким образом, исследования методом ПЭМ подтверждают выводы, сделанные ранее на основании спектроскопии комбинационного рассеяния света и инфракрасной спектроскопии, а также рентгеноструктурного анализа.

Заключение

В результате проведенных экспериментов была показана возможность использования НП Cu, полученных методом ЭВП в качестве катализаторов для синтеза УНВ. Стабильный рост УНВ осуществлялся при температурах, значительно ниже обычно используемых при термическом ХОГФ на медных катализаторах. Эксперименты показали, что нижняя температурная граница синтеза для НП и сепарированных порошков меди – 250 °С, а оптимальный температурный диапазон – 250–300 °С, при этом рост УНВ наблюдался во всем диапазоне давлений 100–500 мбар (с шагом 100 мбар). УНВ имеют различные диаметр (50–200 нм) и морфологию (от спиралевидных до прямых). Кластеры меди находятся как на концах УНВ, так и внутри. Результаты рентгеноструктурного анализа показали присутствие гало при малых значениях угла 2θ , которое указывает на аморфную природу выращенных структур. КРС спектры всех исследуемых образцов представлены двумя характерными углеродными (графитовыми) пиками G и D в областях 1583–1602,3 и 1347,5–1389,3 см^{-1} соответственно. Во всех спектрах отсутствуют группы, отвечающие за дальний порядок. Исследования методом ПЭМ показали, что УНС не обладают внутренним каналом и представляют собой сплошные нановолокна.

Полученные в ходе проведения исследований результаты обладают высоким потенциалом для разработки эффективной, энергетически выгодной, недорогой технологии синтеза УНВ без использования дорогостоящих газов и с возможностью регулировать структуру и свойства макроскопическими параметрами. Синтезированные УНВ не обладают высокими кристаллографическими свойствами (степень кристалличности, геометрическая направленность и др.). Однако в областях промышленности, где не

требуется структурное совершенство (например, армирующий компонент в бетоне, полимерах, пластиках, керамике и др. материалах; основа для активных сорбентов; в композиционных материалах при изготовлении медицинских протезов), применение таких УНВ является перспективным.

Список литературы

1. *Krueger A.* Carbon Materials and Nanotechnology. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. 475 p.

2. *Радущкевич 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., 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 // Тр. МФТИ. 2011. Т. 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. Т. 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 U. R., Kaichao Yu., Muhammad Naveed U., Muhammad Naveed A., Khalid Kh., Nasir A., Muhammad Tariq J.* Catalyst role in chemical vapor deposition (CVD) process: a review // Rev. Adv. Mater. Sci. 2015. Vol. 40. P. 235–248.

10. *Лернер М. И.* Электровзрывные нанопорошки неорганических материалов: тех-

нология производства, характеристики, области применения: Дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2007. 325 с.

11. *Ильин А. П.* Развитие электровзрывной технологии получения нанопорошков в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете // Изв. ТПУ. 2003. Т. 306, № 1. С. 133–139.

12. *Партизан Г., Мансуров Б. З., Медянова Б. С., Кошанова А. Б., Алиев Б. А.* Исследование электровзрывных нанопорошков никеля // Горение и плазмохимия. 2016. Т. 14, № 1.

13. *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.

14. *Partizan G., Mansurov B. Z., Medyanova B. S., Aliyev 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.

15. *Partizan G., Mansurov B. Z., Aliyev B. A., Medyanova B. S., Xin Jiang, Mansurov Z. A.* Low temperature growth of carbon nanostructures by thermal CVD on the particles of iron nanopowders // Proc. of the Annual International World Conference on Carbon (Carbon 2015). Dresden, 2015. P. 232.

16. *Faraj A. Abuilawi, Tahar Laoui, Mamdouh Al-Harhi, Muataz Ali Atieh.* Modification and functionalization of multiwalled carbon nanotube (MWCNT) via Fischer esterification // The Arabian Journal for Science and Engineering. Vol. 35. No. 1C. P. 37–48.

17. *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.

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

G. Partizan^{1,2}, **B. Z. Mansurov**¹, **B. S. Medyanova**^{1,2}, **A. B. Koshanova**^{1,2}
M. E. Mansurova², **B. A. Aliyev**², **Xin Jiang**³

¹ *The Institute of Combustion Problems
172 Bogenbay Batyr Str., Almaty, 050012, Kazakhstan*

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

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

*gulmira.partizan@gmail.com, mansurov_batyr@mail.ru, bota2192@mail.ru, aijan_93@list.ru
mansurova01@mail.ru, Bahodir.Aliyev@kaznu.kz, jiang@lot.mb.uni-siegen.de*

STRUCTURE and MORPHOLOGY OF CARBON NANOFIBERS SYNTHESIZED ON Cu NANOPOWDERS

This article presents the results of experiments on the synthesis of carbon nanofibers by thermal chemical vapor deposition using copper nanopowders obtained by electric explosion of wire as catalysts. Stable growth of carbon nanofibers was carried out at temperatures significantly lower than normally used. The process parameters that are optimal for low-temperature growth of carbon nanofibers have been identified during the performed experiments. The synthesized samples have different diameters and morphology (from spiral to direct). Copper clusters are both at the ends and inside the fibers. The results of IR spectroscopy indicate that the structure of the obtained carbon nanofibers is polymeric. X-ray analysis revealed the presence of a halo on the diffraction patterns at small values of the angle 2θ , which proves that the grown structures have an amorphous nature. There are no groups that are responsible for long-range order in all Raman spectra. Studies by transmission electron microscopy showed that nanostructures do not have an internal channel and nanofibers are solid.

Keywords: thermal chemical vapor deposition, carbon nanostructures, copper nanopowders, low-temperature synthesis of carbon nanofibers.