НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ИФЖ

Инженерно-физический журнал

JOURNAL OF ENGINEERING PHYSICS AND THERMOPHYSICS

Отдельный оттиск
Offprint

Том 89, № 4
Vol. 89, No. 4

ИЮЛЬ–АВГУСТ
JUNE–AUGUST

2016

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в январе 1958 г.

2016. ТОМ 89, № 4 (ИЮЛЬ–АВГУСТ)

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОПЕРЕНОС ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

Хабеев Н. С. Динамика "двухфазного" пузырька в волнах сжатия 791

Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Пискунов М. В., Стрижак П. А. Влияние "собственного излучения" продуктов сгорания на интенсивность испарения неоднородной капли воды в пламени 795

Китанин Э. Л., Смирнов Ю. А., Лебедев М. Е. Развитие течения и теплообмена при заполнении водой трубопровода с начальной температурой стенки ниже точки замерзания 805

Богослов Е. А., Данилаев М. П., Михайлов С. А., Польский Ю. Е. Энергетическая эффективность интегральной противообледенительной системы на основе фторопластовых пленок 812

Тонконог В. Г., Баянов И. М., Тонконог М. И., Мубаракшин Б. Р. Технология газификации сжиженного природного газа 818

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ДИСПЕРСНЫХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Шваб А. В., Евсеев Н. С. Моделирование процесса фракционного разделения частиц в пневматическом центробежном аппарате 826

Агафонова Н. Д., Парамонова И. Л. Оценка размера капель в дисперсном потоке 837

Гончарова Г. С., Храмченков М. Г. Математическая модель гидроразрыва пласта 846

Чиглинцев И. А., Насыров А. А. Моделирование процесса наполнения купола-сепаратора с разложением газогидрата, образовавшегося в период монтажа установки 851

Волков Р. С., Забелин М. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Трансформация водяного снаряда при свободном падении в условиях воздействия ортогонального направлению его движения потока воздуха 861

Безродный М. К., Рачинский А. Ю., Барабаш П. А., Голияд Н. Н. Параметрические границы эффективного использования центробежной водяной форсунки в контактных утилизаторах теплоты отходящих газов 868

Васильев Л. Л., Канончик Л. Е., Цитович А. П. Комплексное исследование сорбционного аккумулятора газообразного топлива с терморегулированием 876

Ольшанский А. И. Исследование сушки тонких материалов с использованием обобщенных комплексных переменных 884

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Моренко И. В., Снигерев Б. А. Неизотермическое обтекание кругового цилиндра с проницаемым слоем при умеренных числах Рейнольдса 895

Борзенко Е. И., Шрагер Г. Р. Течение неньютоновской жидкости со свободной поверхностью 901

Борзенко Е. И., Фролов О. Ю., Шрагер Г. Р. Влияние вязкой диссипации на деформацию и ориентацию элементов жидкости при заполнении трубы 910

Прокудина Л. А. Нелинейное развитие неустойчивости Марангони в жидких пленках 920

Asghar S., Abbas Z., Mushtaq M., and Hayat T. Flow and Heat Transfer Analysis in a Deformable Channel 927

Пикулев А. А., Турутин С. Л., Соснин Э. А. Расчетное исследование влияния гравитационной конвекции на параметры газовой смеси XeCl-эксилампы барьерного разряда 940

Devi T. T. and Kumar B. Optimal Impeller Clearance for a Dual Stirred Unbaffled Tank with a Concave Blade Impeller 948

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В РЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Абайдуллин Б. Р., Вачагина Е. К., Кадыйров А. И. Сравнение реологических моделей Кутателадзе–Хабахпашевой и Оствальда–де Виля при описании обобщенных ньютоновских жидкостей с использованием экспериментальных измерений....954

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛООБМЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Шевелев В. В. Стохастическая модель теплопроводности со стохастическими граничными условиями....962

Формалев В. Ф., Колесник С. А. Аналитическое исследование теплопереноса в анизотропной полосе при задании тепловых потоков на границах....973

Кот В. А. Граничные характеристики для обобщенного уравнения теплопроводности и их эквивалентные представления....983

Дилигенская А. Н., Рапопорт Э. Я. Метод минимаксной оптимизации в коэффициентной обратной задаче теплопроводности....1007

Янковский А. П. Уточнение верхней и нижней границ эффективных коэффициентов теплопроводности ребристо-армированных композитных сред....1013

НАНОСТРУКТУРЫ

Дубкова В. И., Корженевский А. П., Крутько Н. П., Комаревич В. Г., Кульбицкая Л. В. Наноалмазы детонационного синтеза в композициях сверхвысокомолекулярного полиэтилена....1024

Шабанова Т. А., Приходько Н. Г., Ауелханкызы М., Мансуров З. А. Фуллериты и "структуры роста" нанообъектов....1034

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА

Кравчук А. С., Кравчук А. И., Попова Т. С. Уравнение диффузии композиционной смеси в композиционную среду....1041

ОБЗОРЫ

Фомин Н. А. Как появился термин "ударные волны"....1047

ПОПРАВКА

На статью Мерзликиной Д. А., Пышнограя Г. В., Пивоконского Р., Филипа П. Реологическая модель для описания вискозиметрических течений расплавов разветвленных полимеров. Т. 89, № 3....1068

Ответственный за выпуск: Л. Н. Шемет

Подписано в печать 01.07.2016. Формат 60×84⅛. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 32,55. Уч.-изд. л. 27,31. Тираж 102 экз. Заказ 138.

Отпечатано в Республиканском унитарном предприятии «Издательский дом «Беларуская навука».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/18 от 02.08.2013.
ЛП № 02330/455 от 30.12.2013.

220141, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 40

© Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси

УДК 541.183;541.124;543.54

Т. А. Шабанова[1], Н. Г. Приходько[2], М. Ауелханкызы[2], З. А. Мансуров[2]

ФУЛЛЕРИТЫ И "СТРУКТУРЫ РОСТА" НАНООБЪЕКТОВ

Электронно-микроскопическими методами исследованы структуры фуллеритов, образующихся из фуллеренсодержащих саж. Предложен принцип идентификации фуллеренсодержащих материалов. Предполагается, что одна из обнаруженных морфоструктур может явиться начальным этапом формирования наноиндивидов различного состава.

Ключевые слова: *фуллерен, фуллерит, морфоструктура, расчет электронограмм.*

Введение. Уникальные свойства фуллеренов и потребность в их производстве стимулируют всесторонние исследования как самих фуллеренов, так и их многочисленных структурных композиций. Молекула фуллерена в потоках рентгеновских лучей или электронов не проявляет периодичности кристаллической решетки, и речь обычно идет о фуллеритах, фуллеридах или их производных [1]. Установлено [2–4], что при комнатной температуре C_{60}-фуллерит имеет гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку. С понижением температуры ГЦК решетка переходит в простую кубическую. C_{70}-фуллерит при комнатной температуре образует гексагональную плотную упаковку (ГПУ) [5, 6]. При синтезе фуллерен C_{70} обычно образуется в 5–6 раз меньшем количестве, чем C_{60}.

Методика исследования. Качественную и количественную информацию об особенностях расположения атомов в той или иной фазе углерода получают при расчете полученных экспериментально значений, сравнивая их с присутствующими в базах данных кристаллических решеток PDF WIN [7]. Однако синтезируемое фуллеренсодержащее вещество (фуллереновые сажи) не является гомогенным, что может привести к искажениям в определениях. Причинами неоднозначности проявляющихся отражений могут быть следующие факторы:

1) рентгенограммы показывают, что во многих исследованных производных фуллеренов молекулы ротационно разупорядочены [5];

2) при упаковке фуллеренов (рис. 1) возможен захват примесей [8, 9]. Причиной уширения рефлексов на электронограммах и разброса в значениях межплоскостных расстояний (кроме малых размеров зон когерентного рассеяния) может быть присутствие нескольких фаз (рис. 1, *а*, *б*). Также одной из причин размытия рефлексов может стать проявление неустойчивости значений межплоскостных расстояний композитов, вызванное взаимодействием наноразмерных молекул образовавшегося фуллерита с веществом, в котором они находятся (рис. 1, *в*);

3) кристаллы фуллеренов и их производных содержат много дефектов и часто являются двойниками [7, 8];

4) вещества содержат трудноразделимый спектр фуллеренов [10].

Отмеченные выше и другие факторы приводят к размытию рефлексов дифракционной картины. Методы электронной микроскопии позволяют глубже исследовать отдельные частицы гетерогенных образцов и получать их характеристики. Имея длину волны источника излучения на порядок меньше, чем используется в рентгенофазовом анализе (РФА), методы просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) расширяют возможность исследования наноматериалов. Они выявляют наличие кристалличности в частицах и образуемых ими морфоструктурах и дают возможность визуализировать морфологические

[1]Институт геологических наук им. К. И. Сатпаева. Республика Казахстан, 050010, г. Алматы, ул. Кабанбай батыра, 69; э-почта: shabanova-tatiyana@list.ru; [2]Институт проблем горения. Республика Казахстан, 050012, г. Алматы, ул. Богенбай батыра, 172; э-почта: ZMansurov@kaznu.kz. Поступила 09.01.2016.

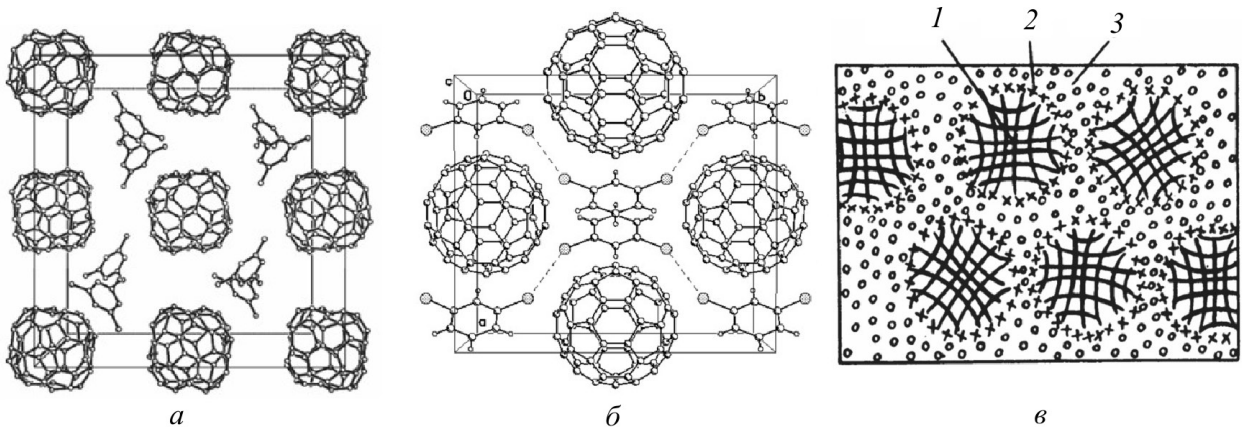

Рис. 1. Модели некоторых фуллеритовых решеток [7–9]: вхождение примесных групп молекул в кубическую ячейку однотипных (*а*), разных фуллеренов (*б*). Изменение значений параметров фуллеритов в матрице (*в*): *1* — ближе к центру кристала; *2* — на периферии кристалла; *3* — в объеме матрицы

разности, существующие одновременно. Прямая визуализация объектов таких размерностей является важной привилегией данного метода. Однако применяемые дифракционные методы ПЭМ, как и большинство методов исследования, являются методами сравнения. Поэтому при идентификации экспериментально полученных материалов необходимо выявить диагностические признаки, характеризующие наличие фуллеренсодержащих веществ и, в первую очередь, C_{60}–C_{70}.

Объектом исследований явились фуллериты, образующиеся из фуллеренсодержащей сажи в условиях ПЭМ (Jem 100CX, 100 кэВ). Препараты сажи для исследований готовились методом сухого препарирования, исключающего контакт с растворителями, на аморфной угольной подложке. Задачей исследования явилось выявление морфоструктур (понятие, неразрывно связанное с морфологической и кристаллической структурой отдельных частей, слагающих частицу) образующихся частиц и возможность их идентификации.

Рисунки приведены в негативном изображении, по мнению авторов они более четкие. Все размеры, определяемые по морфологическим картинам — видимые в плоскости изображения.

Результаты и их обсуждение. Проведено ПЭМ-исследование фуллереновых саж, синтезированных в бензол-кислородных пламенах [1, 11]. Наличие в полученном веществе фуллеренов определялось рентгеновским, масс- и ИК-спектроскопическими методами.

Частицы фуллеренсодержащих саж при исследовании в электронном микроскопе под воздействием электронного пучка трансформируются: активированная потоком электронов часть углеродистого вещества способна отторгаться из массы частицы [1]. При этом образуются различные самостоятельные системы, имеющие различную энергетическую насыщенность. Часть таких соединений удаляется при вакуумировании микроскопа, часть оседает на других частицах образца и подложке, и некоторая часть остается в преобразованном материале исходной частицы. "Осевшие" фрагменты распавшегося вещества имеют малые (ангстремные) размеры и неразличимы в используемом электронном микроскопе. Присутствие "выпавших" частиц выявляется по их высокой активности — они вызывают бурное (мгновенное) образование частиц с новыми морфоструктурами. Такое поведение не противоречит данным И. С. Неретина о наличии "квантово-химически запрещенных" фуллеренов с высокой реакционной способностью [8].

На аморфной угольной подложке появляются полупрозрачные бесформенные образования (рис. 2, *а*). Поверхности частиц образца, на которые попадают такие "активные" частицы, покрываются структурами различного вида (рис. 2, *б–г*). Зафиксированы плоскостные структуры, частицы с периодически расположенными бугорками/порами, фрагменты пленок с крупными порами в пространстве типа "вязь" и др.

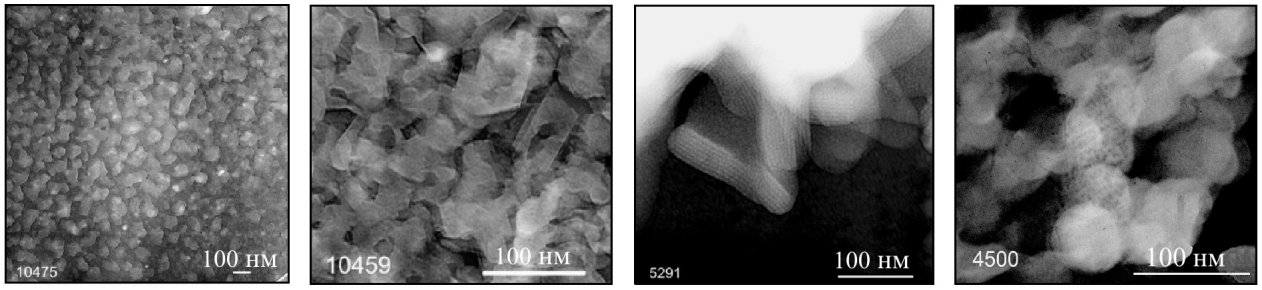

Рис. 2. ПЭМ-снимки новообразований: на аморфизированной углеродной подложке (*а*), обрывки дырчатых пластинчатых частиц (*б*), упорядоченные ряды (~7 нм) в округлой частице (*в*), "вязь" (поры ~7 нм) на округлых частицах (*г*)

Проведенные ранее исследования показали, что чем выше температура подложки, на которую осаждались фуллерены, тем отчетливее морфоструктурные характеристики полученной фуллереновой пленки [8]. В наших экспериментах температура подложки (аморфный углерод) ниже, чем у слабо скрепленных с ней частиц фуллеренсодержащих саж, что обусловлено примененным методом "сухого препарирования". Это положение подтверждено и морфологическими картинами, и электронограммами (рис. 3). Дифрактограмма исходной частицы состоит из нескольких фаз для веществ, которые агрегатированы/сплавлены в одно целое (рис. 3, *а*). В дальнейшем, при воздействии пучка электронов эти частицы способны дифференцироваться. Часть из них, как уже было сказано выше, отторгается и формирует на поверхности препарата для ПЭМ-исследований фуллеренсодержащие образования — фуллериты. Экспериментально полученная кубическая решетка фуллеритовых новообразований на поверхности теплых частиц (рис. 3, *б*), как и указано в работах [8], на дифракционных картинах имеет рефлексы четче, чем у фуллерита, образовавшегося на пленке-подложке (рис. 3, *в*). Идентификация микродифракционных картин, полученных от композитов (кристаллитов образца с новообразованиями на поверхности), показала, что вещество имеет преимущественно C_{60}-фуллереновые ряды кубических (карточки № 79-1715, № 44-0558, № 82-0505) и ромбических (№ 49-1721) сингоний. Реже встречается фуллеренсодержащее вещество ряда C_{70} (№ 48-1206 гексагональной и № 48-1449 ромбоэдрической упаковки).

Аналогичное разнообразие морфоструктур получено нами при ПЭМ-исследованиях и в других (даже зарубежных коммерческих) "гомогенных" образцах фуллеренов. Расшифровка электронограмм, полученных от образцов, показала наличие C_{60}- и C_{70}-фуллереновых структур различной кристаллографической принадлежности. Бóльшая часть наборов рефлексов не имеет однозначной принадлежности к "фуллерену" определенного вида. Почти треть полученных электронограмм (по характеру рефлексов)

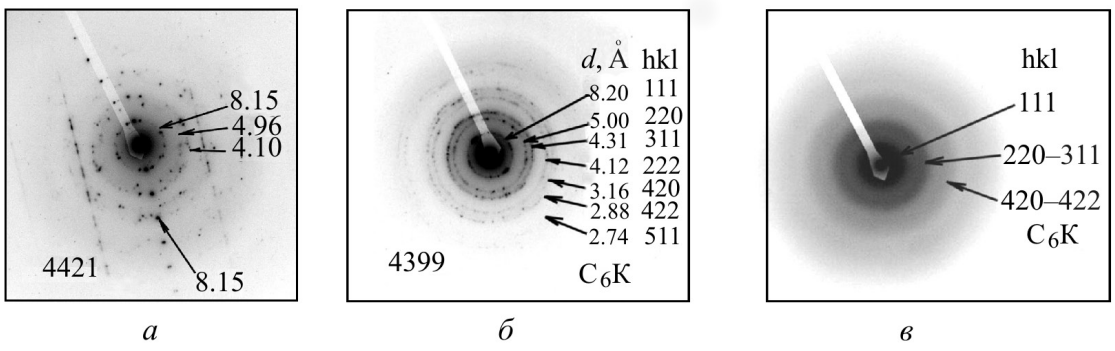

Рис. 3. Электронограммы, полученные от частицы образца фуллереновой сажи до трансформации (*а*), частиц, оставшихся в контурах исходного материала (*б*), и новообразований на аморфизированной подложке (*в*)

указывает на присутствие фуллеренсодержащих веществ, вероятно, принадлежащих другим фазам фуллеритов [12]. Но зачастую достаточно знать, что вещество содержит, например, C_{70}-фуллерен. Исходя из этих соображений, был предложен упрощенный способ идентификации фуллеритов.

Способ идентификации электронограмм фуллеренсодержащего вещества. Образовавшиеся в вакууме фуллеритовые фазы могут включать только материал частиц, присутствующих при их росте — углерод. Если допустить, что микродифракционная картина образована упаковкой, показанной на рис. 1, *а*, куда в качестве "примесей" при формировании структур входят аморфные вещества (углерод, оксиды кремния, элементы подложки и т. д.), то образовавшаяся структура будет иметь параметры, не соответствующие существующим в базе PDF WIN [7]. Например, зафиксированные фуллериты с внешним видом, похожим на фуллерен (рис. 4), самодостаточные молекулы, которые при формировании для компенсаций возникающих напряжений, возможно, используют аморфизированный углерод или фтор. Рефлексы от пучка электронов на электронограммах этих кристаллитов/молекул не проявляются вовсе.

Наличие примесей может стать причиной того, что значительное количество расчетных межплоскостных значений можно сопоставить сразу с двумя и более карточками базы данных [1, 7]. Исходя из предположений о неоднородности кристаллической упаковки нанокристалликов фуллеритов, нами было предложено "усреднение" экспериментально полученных параметров (таблица). Вводится допуск/погрешность 0.1 Å для всех измеряемых параметров *d*. В этом случае можно идентифицировать фуллеритовое вещество, например, как содержащее C_{60}-фуллерен (C_{60}К) кубической модификации (карточки 81-2220, 82-0505, 44-0558, 43-0995) или как содержащее смесь фуллеренов C_{60}Г–C_{70}Р и т. д. Этот способ призван облегчить трудоемкий процесс определения вида фуллеренов в фуллеритовом веществе.

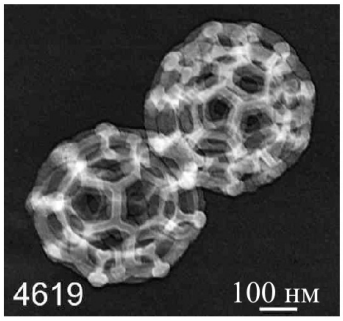

Рис. 4. ПЭМ-снимок индивидуальных молекул фуллерита

Наиболее часто формирующиеся структуры новообразований фуллеритов: на основе C_{60}-фуллеренов и C_{60}–C_{70}-фуллеренов

Базальные рефлексы, Å 8.14, 8.17, 8.21			Базальные рефлексы, Å			Базальные рефлексы, Å		
C_{60}К, №81-2220/82-0505, 43-0995, 44-0558			возможно C_{60}К, №82-0505			C_{60}Г (№47-0787)/C_{70}Р (№ 50-1363)		
I	*d*, Å	hkl	*I*	*d*, Å	hkl	*I*	*d*, Å	hkl
8	8.14–8.3	111	10	8.3–8.5	111	8	8.7–8.8	100/003
8	4.9–5.0	220	10	5.1–5.2	220 (002)	10	5.2–5.3	110/104
8	4.1–4.2	222–311	10	4.4–4.6	220–311	10	4.4–4.5	112/110
5	3.1–3.2	420–331	8	4.2–4.3	311	4	3.3–3.4	114/205
5	2.8–2.9	422	5	3.2–3.3	331–400	3	3.0–3.1	Нет рефлекса/214
5	2.7–2.8	511/333	4	2.9–3.1	422–024	3	2.9–3.0	009/009
3	2.0–2.1	444/711	4	2.8	422–333			
3	1.5–1.6	911	1	2.16				
*	"2, 1, 4(2), 4(4)		*	"2, 4(2), 4(3)		*	"4(1)	

Примечание: * — шифр образца, " — преобладают в образце; C_{60}К, C_{60}Г, C_{70}Р — разновидности фуллерита и его сингонии (кубическая, гексагональная и ромбическая модификации кристаллической решетки); 81-2220 — номер карточки в PDF WIN; *I* — интенсивность рефлекса на электронограмме; *d*, Å — вычисленное по дифрактограмме значение параметра; hkl — индекс параметра по карточке PDF WIN/ индекс рефлекса по другой карточке PDF WIN.

Часто распределение новообразований на поверхности препарата фуллереновой сажи указывает направление на трансформировавшуюся частицу (рис. 5, *а*, *б*). Фрагменты распадающейся частицы оседают на неоднородностях поверхности со стороны "распыления". Преимущественное направление роста новых морфоструктур, в данном случае "ворсистых" (рис. 5, *в*), и их размер, очевидно, определяется структурой частицы, на которой происходит формирование новой фазы [13]. Различные виды "ворсинок" имеют разные параметры. Они состоят из звеньев округлых торроидальных образований, образующих цепь. На основании анализа зафиксированных морфоструктур была предложена схема устройства "ворсинок". На приведенной схеме (рис. 5, *г*) видимая ширина "ворсинки" составляет 8–10 нм. Ширина ("вид в фас") углеродистой стенки новообразованного кольца составляет 1.3–2.3 нм, толщина ("вид в профиль") до 3 нм, внутренний диаметр тора/звена — 1.6–2.6 нм, расстояние между центрами двух соседних ворсинок — 3.0–3.3 нм. Встречается "ворс" с внутренним диаметром полостей тора/звена до 10 нм.

Экспериментально установлено, что рост фуллеритовых структур отчетливо проявился на аморфных углеродных и был слабо заметен на кристаллических (алюмосиликатных) поверхностях. Для проверки этого наблюдения были приготовлены препараты C_{60}-фуллеренсодержащих саж на аморфной оксидно-кремниевой и поликристаллической алюминиевой подложках. При аналогичных ПЭМ-исследованиях этих препаратов отмечено появление и рост вышеописанных фуллеритов на аморфной подложке и отсутствие подобных новообразований на кристаллической пленке-подложке. Следовательно, для развития "ворсистых" волокон требуется аморфизированное вещество и энергия для образования химических связей, присутствующая у выпавших энергетически напряженных активных частиц. Интересным является то, что зафиксированные в эксперименте удлиненные ячеистые частицы (ворсинки), наблюдаются не только в углеродных системах, но и других, например, в кремнийсодержащих, в синтетических и природных образцах. Причем разновидность процесса синтеза не является лимитирующим параметром. Для формирования "фуллеритоподобных" структур важно, как отмечено выше, наличие определенных термодинамических условий в нанозоне в процессе формирования, т. е. наличие аморфизированной среды — поставщика материала для роста и энергетической затравки.

Иногда "фуллеритоподобные" структуры визуально можно наблюдать в ПЭМ применительно к частицам, находящимся в термодинамически неустойчивом состоянии, для которых воздействие пучка электронов или небольшой температуры (до 300 ^{o}C) достаточно для инициации роста описанных структур. На рис. 6 показан рост ячеистых нанообразований при взаимодействии каталитической частицы (неуглеродной, образовавшейся в процессе синтеза) с аморфной углеродной пленкой-подложкой. Процесс протекает в вакууме, при наличии минимального давления пара, существующего на расстоянии долей микрона от подложки, на которую нанесен образец. Рост наночастиц, аналогичный схеме (рис. 5, *г*), вероятно, является достаточно распространенным явлением и вне колонны микроскопа. На рис. 6, *а* [14], *б* [15], *в* [16], *г* [17] показан "фуллереноподобный" каркасный ворс, наблюдаемый на частицах различных материалов.

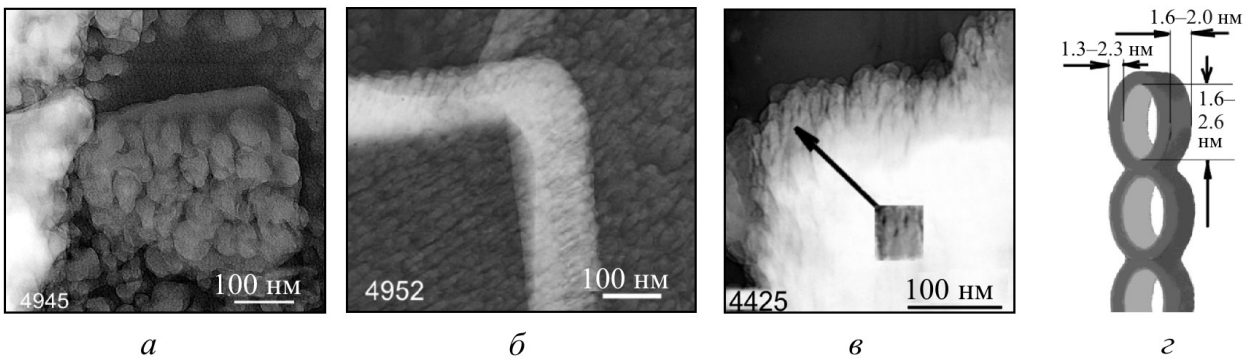

Рис. 5. ПЭМ-снимки новообразований [1]. Направленный рост новообразований на поверхности частиц образца фуллереновых саж (*а*–*в*). Схема строения "ворсинки" (*г*)

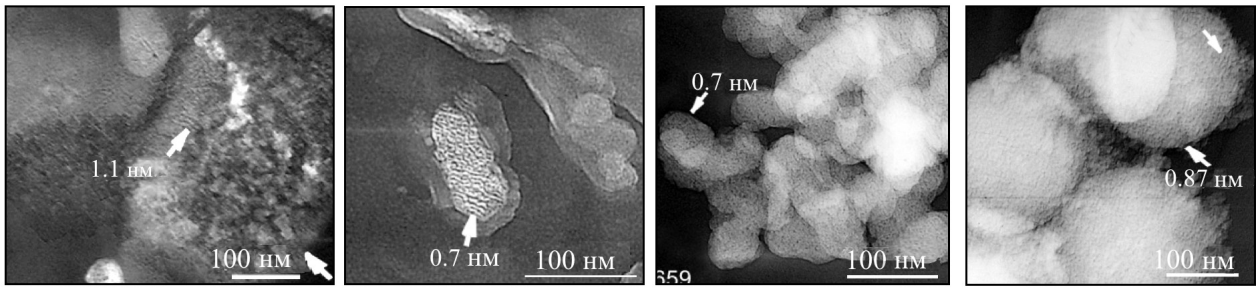

Рис. 6. ПЭМ-снимки "фуллереновых структур" (на снимках указаны размеры колец, их составляющих): сажи (горение бензол-кислородной смеси с аэрозольным вводом катализатора) [14] (*а*); образец пшеничных отрубей (процесс карбонизации [15]) (*б*); оксиды кремния — искусственный ("белые сажи", отход Ti-производства [16]) (*в*) и природный (опаловые структуры с "зеленой" побежалостью [17]) (*г*)

Подобные "фуллереновые" (отмеченные для фуллеренсодержащих материалов) и "фуллереноподобные" структуры (зафиксированные пока только на углеродной подложке) достаточно хорошо выражены и, возможно, являются одной из первых стадий роста многих веществ. Диаметры звеньев и габариты стенок подобных цепей при более детальном исследовании, вполне возможно, будут коррелировать с наличием конкретных элементов, захваченных при формировании композитов, и по длине такого пористого волокна (по числу звеньев) и наличию их упорядоченного расположения в образующейся "крупной" частице можно будет судить о структурной упорядоченности вещества.

Заключение. При ПЭМ-исследованиях получено изображение различных фаз фуллеритов. Предложен упрощенный способ определения вида фуллеренов в фуллеритах (без строгой привязки к кристаллической решетке фуллеренов базы PDF WIN). "Ворсистые" структуры могут стать индикатором состояния частиц вещества.

Обозначения

C_{60}-фуллерен — сфера, Å (10^{-10} м), нм (10^{-9} м); C_{60}-фуллерит — молекулярная решетка, построенная из молекул C_{60}-фуллерена; C_{70}-фуллерен — сфероид, Å, нм; C_{70}-фуллерит — молекулярная решетка, построенная из молекул C_{70}-фуллерена; C_{60}–C_{70} — смесь, состоящая из молекул C_{60}-фуллерена и C_{70}-фуллерена; d — расстояние между плоскостями в кристаллической решетке, Å или нм.

Литература

1. **Шабанова Т. А., Левин В. Л., Приходько Н. Г., Мансуров З. А.** Новая характеристика C_{60}–C_{70}-фуллеренсодержащего вещества (по данным электронной микроскопии). *Вестник КазНУ. Сер. Химическая.* 2005. Т. 39, № 3. С. 43–48;

2. **Osawa E.** Elucidation of dynamic mechanism for the spontaneous formation of C_{60} structure and thereafter — a new realm of computer chemistry. *J. Comput. Chem. Jpn*. 2011. Vol. 10, No. 4. Pp. 31–38.

3. **Сидоров П. Н., Юровская М. А., Борщевский А. Я., Трушков И. В., Иоффе И. Н.** *Фуллерены*. Москва: Экзамен, 2005.

4. **Головин Ю. И.** *Основы нанотехнологий*. Москва: Машиностроение, 2012.

5. **Макарова Т. П.** Электрические и оптические свойства мономерных и полимеризованных фуллеренов. *Физика и техника полупроводников*. 2001. Т. 35, № 3. С. 257–293.

6. **Кузнецов Н. Т., Новоторцев В. А., Жабрев В. А., Марголин В. И.** *Основы нанотехнологии*. Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2014.

7. ***ICDD PDF WIN.*** Realise 1996.

8. **Неретин И. С., Словохотов Ю. Л.** Кристаллохимия фуллеренов. *Успехи химии*. 2004. Т. 5, № 73. С. 492–525.

9. **Раков Э. Г.** *Нанотрубки и фуллерены*. Москва: Логос, 2006.

10. **Aoyagi S., Nishibori E., Sawa H.**, et al. A layered ionic crystal of polar Li@C_{60} superatoms. *Nature Chem*. 2010. Vol. 2, No. 8. Pp. 678–683.

11. **Howard J. B.** Combustion synthesis of fullerenes and fullerenic nanomaterials for large-scale applications. *Abstr. Int. Conf. on Carbon*. 2004. P. 57.

12. **Шабанова Т. А.** Структуры C_{60}-фуллеритов по данным электронной микроскопии. *Горение и плазмохимия*. 2010. Т. 8, № 4. С. 299–309.

13. **Григорьев Д. П.** *Основы конституции минералов*. Москва: Недра, 1966.

14. **Шабанова Т. А., Мансуров З. А.** Фуллереновые структуры различных материалов. *Вестник КазНУ. Сер. химическая*. 2007. Т. 45, № 1. С. 328–332.

15. **Мансурова Р. М.** *Углеродсодержащие композиции. Химия, химическая технология. Современные проблемы*. Алматы: XXI век, 2001.

16. **Шабанова Т. А., Каршигина З. Б., Абишева З. С., Бочевская Е. Г.** Исследование влияния pH на морфоструктуры осажденного диоксида кремния (белой сажи). *Сборник по материалам конференции под ред. проф. Л. В. Кожитова.* Москва: МГИУ, 2009.

17. **Шабанова Т. А., Вятченникова Л. С., Глаголев В. А.** Элекронно-микроскопическое исследование синтетических иризирующих опалов. *Материалы международной конференции "Геология, минерагения и перспективы развития минерально-сырьевых ресурсов" (Сатпаевские чтения)*. Алматы, 2009. С. 385–391.