

УДК 539.3:621.374:541.1+620.1/2

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ

З. А. Мансуров

Институт проблем горения, 050012 Алматы, Казахстан, zmansurov@kaznu.kz

Представлены оригинальные результаты в области синтеза фуллеренов, углеродных нанотрубок и супергидрофобной сажи в углеводородных пламенах, а также данные по самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу наноматериалов, полученные за последние годы в Институте проблем горения.

Ключевые слова: наноматериалы, сажеобразование, фуллерены, углеродные нанотрубки.

ВВЕДЕНИЕ

Основы теории горения были заложены в 1930-е годы в фундаментальных исследованиях Н. Н. Семенова, Я. Б. Зельдовича и Д. А. Франк-Каменецкого [1–3]. В области практического использования процесса горения можно выделить два очень важных направления: энергетическое и химико-технологическое. В первом случае используют тепло реакции горения и очень часто, но не всегда энергию расширяющихся газообразных продуктов. Во втором случае интерес представляет сам продукт горения, который является целевым веществом химико-технологического процесса [4].

Что касается химико-технологического направления, то оно развивалось в отрыве от теории горения, в основном химиками-технологами и металлургами, и свелось к разработке отдельных процессов. К сожалению, уровень исследований и их объем недостаточно высоки и не соответствуют актуальности и большому значению этой проблемы [4, 5].

Главная особенность процессов на основе технологического горения заключается в том, что целевой продукт образуется в результате реакции горения, протекающей самопроизвольно при высоких температурах, с большой скоростью, без затрат энергии извне, т. е. за счет собственного тепловыделения.

Значительный интерес научных и технических специалистов к способам получения, структуре и свойствам наноразмерных систем обусловлен многообразием и уникальностью вариантов их практического применения. Малый размер структурных составляющих — обычно до 100 нм — определяет отличие свойств наноматериалов от массивных

аналогов [6–8].

В последнее десятилетие во многих промышленно развитых странах сформировалась научно-техническое направление «Наночастицы — материалы, технологии и устройства», которое становится самым быстрорастущим по объему финансирования в мире. Уже действуют национальные и транснациональные фирмы, занимающиеся производством наноматериалов, а также крупномасштабными исследованиями в этой области [7, 8].

Образование углеродных волокон впервые наблюдали в 1976 г. при пиролизе бензола [9]. В 1991 г. обнаружены углеродные нанотрубки при дуговом разряде графита [10], после чего началось интенсивное развитие этого направления. Углеродные нанотрубки, благодаря уникальному сочетанию различных свойств, привлекательны с точки зрения как фундаментальной, так и прикладной науки [11, 12].

За последние несколько лет опубликовано более 150 статей по самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу наноматериалов, обзор которых приведен в [13]. В СВС, как и в порошковой металлургии, размеры частиц реагентов существенно влияют как на сам процесс, так и на свойства получаемых материалов [13]. В этом отношении СВС тесно связан с нанотехнологиями.

В статье представлены оригинальные результаты по разработке технологии получения углеродных наноматериалов различного функционального назначения, полученные в Институте проблем горения:

- синтез фуллеренов в пламени;
- синтез углеродных нанотрубок в пламени;
- синтез супергидрофобной углеродной поверхности в режиме горения;
- СВС наноразмерных материалов;

- образование нитевидных кристаллов Al_2O_3 при СВС в системе $\text{Al}-\text{V}_2\text{O}_5-\text{Cr}_2\text{O}_3$;
- синтез наноразмерных катализаторов для углекислотной конверсии метана в синтез-газ.

СИНТЕЗ ФУЛЛЕРЕНОВ В ПЛАМЕНИ

Структура фуллера C_{60} , предложенная Р. Смолли, похожа на футбольный мяч, поэтому его иногда называют футболом, а C_{70} напоминает мяч для игры в регби. Фуллерены C_{60} и C_{70} были идентифицированы в 1985 г. и получены в макроскопических количествах в 1990 г., в обоих случаях методом испарения графита в дуговом разряде [14]. В пламенах ионы фуллеренов обнаружены в 1987 г., а в 1991 г. C_{60} и C_{70} были извлечены в значительных количествах из ламинарных сажеобразующих пламен предварительно перемешанных смесей бензола и кислорода при низких давлениях [15], а затем спектроскопически идентифицированы.

На рис. 1 представлена эволюция углеводородных топлив в полициклические ароматические углеводороды (ПЦАУ) при горении богатых топливом пламен.

Недостаток кислорода приводит к образованию сажи, при этом ПЦАУ являются зародышами ее частиц. Из рис. 1 видно, что ПЦАУ могут конвертироваться либо в сажу, либо в



Рис. 1. Схема процесса сажеобразования в гомогенных системах или в пламенах предварительно перемешанной смеси

фуллерены в зависимости от условий горения, среди которых определяющим параметром является давление.

Известно, что образование и синтез фуллеренов в традиционном методе дугового испарения графита осуществляются при давлениях $p < 40$ Торр [16].

Как указано в [17], в асимптотических гигантских разветвленных звездах в результате газофазной конденсации образуются нано- и субнаноразмерные частицы. Проведены эксперименты при давлении $0.1 \div 2.6, 7$ мбар, близкие к значениям p в астрофизической атмосфере при температурах $T < 1700$ К, при которых наблюдалось образование фуллеренов.

Поскольку фуллерены образуются при низких давлениях, здесь важна соответствующая пространственная ориентация, требующая учета стерического фактора. Для образования молекулы C_{60} необходима пространственная ориентация двух молекул C_{30} . Имеются различные модели образования фуллеренов C_{60} , одна из них осуществляется по механизму «застежка-молния» [18] (рис. 2).

Необходимым условием этого механизма является низкое давление. С возрастанием давления, т. е. при переходе к атмосферному и выше, где преобладают тройные столкновения, происходит коагуляция ПЦАУ и формируются кластеры сажи. В [15] было показано, что максимум образования фуллеренов сдвинут вправо относительно максимума образования сажи. При детальном исследовании образования фуллеренов из пламени бензола обнаружен второй максимум на расстоянии 70 мм от матрицы горелки [19] (рис. 3). Эти данные стали основанием для разработки альтернативного метода получения фуллеренов в режиме горения углеводородов.

В работе [20] исследовано влияние газовой

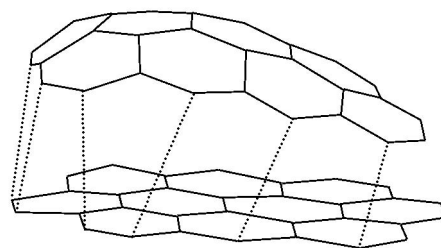


Рис. 2. Модель образования пяти- и шестичленных колец через связь двух ПЦАУ с помощью механизма «застежка-молния» [18]

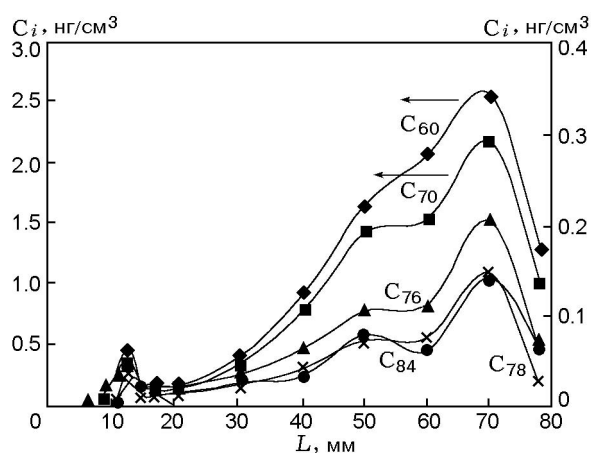


Рис. 3. Профили концентраций фуллеренов на оси пламени предварительно перемешанной смеси бензол — кислород — аргон [19]

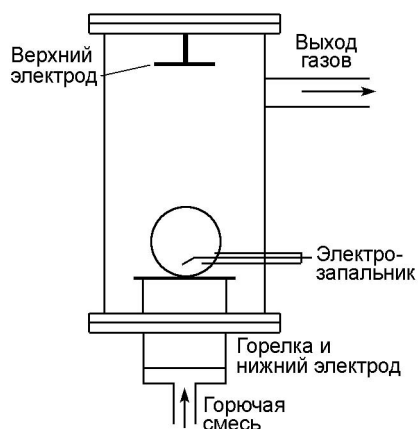


Рис. 4. Схема установки

го разряда, вида электрода и межэлектродного расстояния на эффективность выхода фуллеренов в процессе горения. Схема установки представлена на рис. 4. Условия эксперимента следующие: $C/O = 1$; $p = 40$ Торр; расход бензола $250 \text{ см}^3/\text{мин}$, кислорода $758 \text{ см}^3/\text{мин}$, аргона $101 \text{ см}^3/\text{мин}$; $v = 18.4 \text{ см/с}$; $T = 1200 \text{ К}$; $\delta = 0.5 \div 0.8 \text{ см}$; электродная система: игла — плоскость, плоскость — плоскость, кольцо — плоскость с расстоянием между электродами $4 \div 21 \text{ см}$; напряжение $U = 0.5 \div 20 \text{ кВ}$. Изучалось горение предварительно перемешанной смеси $C_6H_6/O_2/Ag$ в условиях, соответствующих максимальному выходу фуллеренов [20].

Обработка экспериментальных данных выявила преимущество кольцевого электрода по сравнению с электродом в виде иглы и показала наибольший выход фуллерена C_{60} ($\approx 15\%$)

при расположении электрода в средней части пламени ($L = 4 \text{ см}$).

В работе [21] установлено, что если нагревать периферийную зону бензольного пламени каким-нибудь внешним источником, например лазерным лучом, который не просто сжигает сажу, а создает такие же условия, как и в середине пламени, то концентрация фуллеренов увеличивается.

Были проведены исследования по воздействию ацетиленокислородного пламени на разные зоны по высоте бензолкислородного пламени с применением кольцевой горелки. Установлено, что интенсификация процесса формирования фуллеренов происходит на границе соприкосновения ацетиленокислородного и бензолкислородного пламени. Положительное влияние ацетиленового пламени заключается в повышении температуры в верхней части реакционной зоны основного бензолкислородного пламени на 50°C , в увеличении степени ионизации, а также в интенсивном переводе ПЦАУ, имеющихся в бензолкислородном пламени, в фуллерены [22].

СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В ПЛАМЕНИ

Наиболее перспективным способом производства углеродных нанотрубок, по мнению авторов [23], является пламенный метод. В случае использования пламени для синтеза углеродных наночастиц часть топлива расходуется на разогрев смеси, а часть используется как реагент, что делает данный метод более экономичным по сравнению с методами, основанными на использовании электричества, пиролиза углеводородов или дугового испарения графита.

В [24] представлены результаты исследования диффузионного пропанокислородного плоского пламени, стабилизированного на горелке со встречными струями при атмосферном давлении. Два встречных потока образовывали плоское пламя. Пламя было окружено внешним потоком азота, поступавшим из матриц горелок. Раствор катализатора ($Fe(CO)_5$ или спиртовой раствор нитрата никеля) распылялся ультразвуковым распылителем и подавался через металлическое сопло в пламя со стороны топлива. Условия эксперимента представлены в табл. 1.

Полученные продукты осаждались на стенках реактора и улавливались в ловушках с

Таблица 1

Условия эксперимента

Катализатор	Расход катализатора, см ³ /мин	Расход газа, см ³ /мин				Температура пламени, °С
		C ₂ H ₂	O ₂	N ₂	C ₃ H ₈	
Fe(CO) ₅	0.05	130 ÷ 210	100 ÷ 170	50 ÷ 200	—	1700 ÷ 1850
Ni(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	0.05	—	160 ÷ 210	50 ÷ 200	70 ÷ 160	900 ÷ 1150

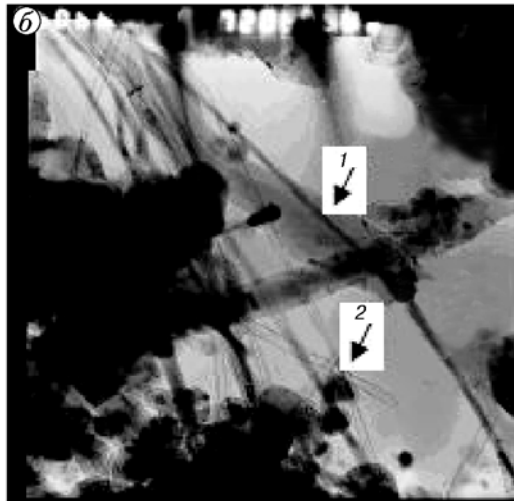
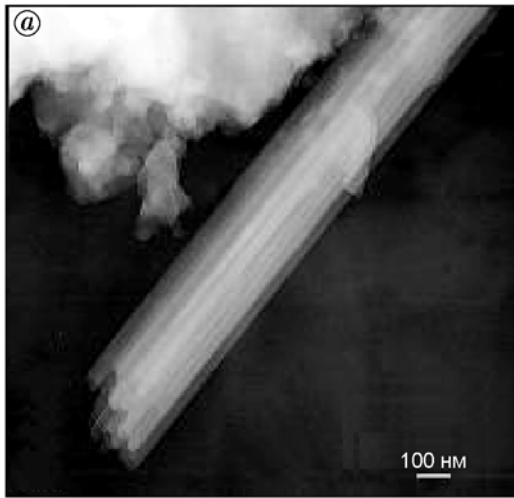


Рис. 5. Электронно-микроскопические снимки образцов:

1 — углеродная нанотрубка, 2 — Ni в углеродной оболочке

жидким азотом. Температура в реакторе измерялась термопарой, в пламени — пирометром Iron Ultrimax.

Из рис. 5 видно, что образцы содержат агломераты сажи, среди которых встречаются металлические частицы. Обнаружено, что при определенных условиях эксперимента возмож-

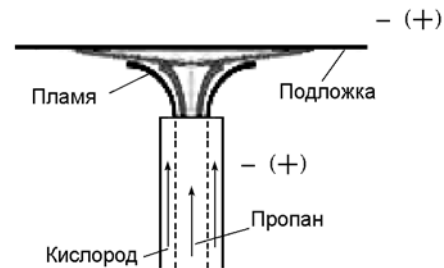


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

но образование хорошо упорядоченных жгутов углеродных нанотрубок диаметром 20 ÷ 30 нм.

СИНТЕЗ СУПЕРГИДРОФОБНОЙ УГЛЕРОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

Проведено экспериментальное исследование осаждения сажи на подложку из кремния и никеля при горении пропанокислородной смеси [25]. На рис. 6 показано схематическое изображение экспериментальной установки. Время воздействия пламени варьировалось от 4 до 10 мин.

Толщина осевшей на подложку сажи составляла в среднем 1 ÷ 1.5 мкм. На поверхности подложки визуально наблюдается разделение осевшей сажи на три зоны. Центральная серая зона окружена коричневой зоной, которая, в свою очередь, охвачена черной внешней закопченной зоной. Электронно-микроскопические снимки образцов сажи, взятых с поверхности подложки, показали наличие нанобисеров ($d = 20 \div 30$ нм), концентрация которых преобладает в средней (коричневой) зоне (рис. 7). При этом средний размер частиц сажи увеличивался от центра к краю.

Из полученного спектра комбинационного рассеяния установлено, что в образце присутствует несколько модификаций углерода. Пики комбинационного рассеяния в районе 1350 см⁻¹ (аморфный) и 1590 см⁻¹ (графитовый) соответствуют фазе аморфного углерода, который наблюдали в [26].

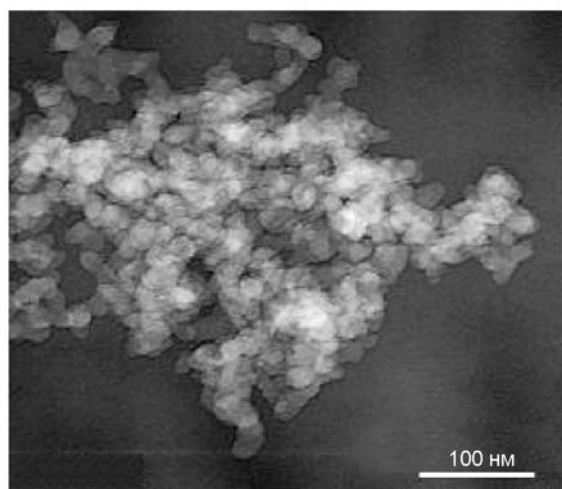


Рис. 7. Электронно-микроскопический снимок сажи из средней зоны ее осаждения

Были сделаны фотографии капли воды, нанесенной на диск, который находился в пламени. На рис. 8, *a* представлена капля на гидрофобной поверхности, причем, как нами обнаружено, гидрофобность поверхности очень стабильная. Внешний угол контакта θ лежит в диапазоне $152.4 \div 157.1^\circ$ во всех случаях. Аналогичная капля воды, нанесенная на гидрофильную поверхность кремния, показана на рис. 8, *б*, внешний угол контакта 50.1° .

Были проведены исследования воздействия электрического поля на гидрофобность или гидрофильность образующейся сажевой поверхности. При наложении электрического поля получена сажа с углом смачивания $>170^\circ$. Влияние электрического поля на супергидрофобность сажи — предмет будущих исследований.

ний.

При наложении электрического поля напряжением 1 кВ и более пламя визуально претерпевает изменения: оно становится ярче, периодически проскакивает искровой разряд и на подложке обильно образуется сажа. Без наложения электрического поля пламя растекается по поверхности подложки. При наложении электрического поля пламя распространяется в форме цилиндра диаметром 1.5 см, причем поверхность сажи получается шероховатой. Наложение электрического поля способствует увеличению толщины углеродного гидрофобного слоя. При этом общая площадь гидрофобной поверхности сужается.

СВС НАНОРАЗМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Получение нанопорошка кремния — важная задача для различного рода применений, включая микроэлектронику, солнечную энергетику и ракетные топлива. В работе [27] получен нанопорошок кремния методом СВС, представляющим собой эффективную технологию получения различных материалов, отличающуюся простотой и малыми энергозатратами. Показана принципиальная возможность получения чистого порошка кремния с высокой удельной поверхностью, выполнен сравнительный анализ продуктов, полученных на основе трех различных оксидов кремния.

В основе метода лежит известный процесс магнийтермического восстановления оксида кремния, но проведенный в режиме самораспространяющейся реакции горения. В качестве исходного сырья использовались по-

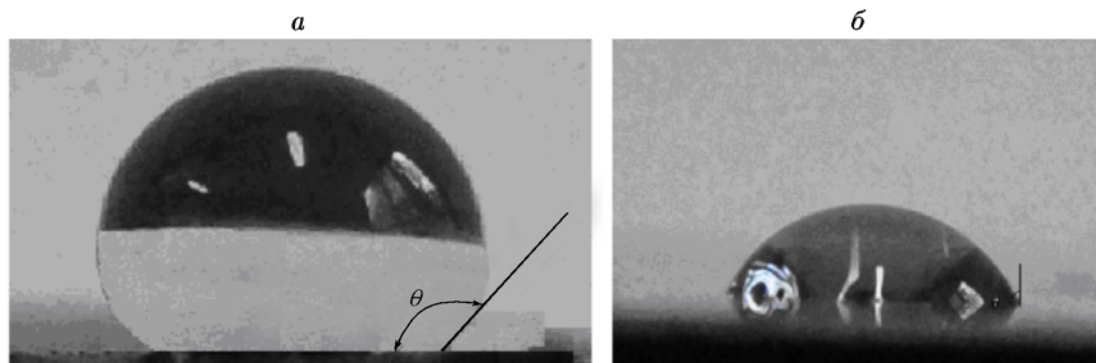


Рис. 8. Капля жидкости на супергидрофобной (*a*) и гидрофильной (*б*) поверхностях

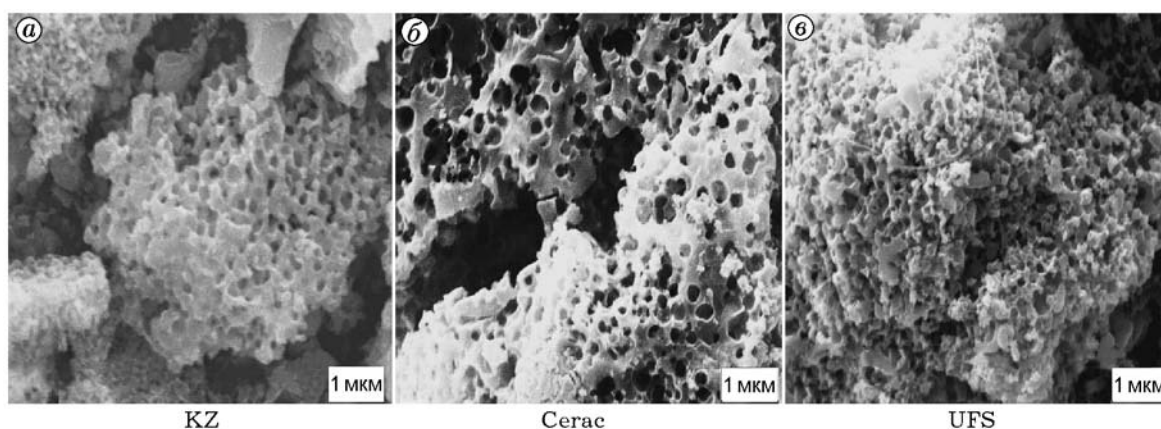
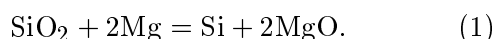


Рис. 9. Частицы синтезированного кремния после химической обработки соляной кислотой

рошки оксида кремния, различающиеся размером частиц и чистотой: (а) кварц казахстанского месторождения Еркен (далее по тексту кварц KZ) чистотой 98.8 % с размером частиц $d \leq 100$ мкм; (б) кварц марки Cerac, WI, USA (далее кварц Cerac) чистотой 99.9 % с размером частиц $d < 44$ мкм; (в) нанокварц марки Untreated Fumed Silica, Cabot Corporation, MA, USA (далее кварц UFS) чистотой 99.9 % с удельной поверхностью ≈ 200 м²/г.

Синтез проводился по следующей реакции:



Для получения чистого кремния синтезированные образцы обрабатывали 36%-й соляной кислотой в течение 3 ч при нормальных условиях. На рис. 9 видно, что характерная микроструктура (морфология и размер) синтезированного порошка кремния слабо зависит от морфологии и размера частиц исходного кварца. Во всех случаях получается очень пористая микроструктура с размером компонентов (пор и отдельных кристаллитов) не меньше 1 мкм.

В результате быстрого остывания микроструктура продукта представляет собой мелкие (≤ 1 мкм) зерна MgO в матрице кремния. После химического удаления MgO получается очень пористый каркас кремния с характерным размером микроструктуры, сравнимым с масштабом размера зерен кристаллов оксида магния. Размер этих зерен определяется исключительно скоростью кристаллизации и температурными условиями в волне горения (скорее всего, скоростью остывания продукта). Наблюдалась слабая зависимость микроструктуры синтезированного кремния от размера SiO₂.

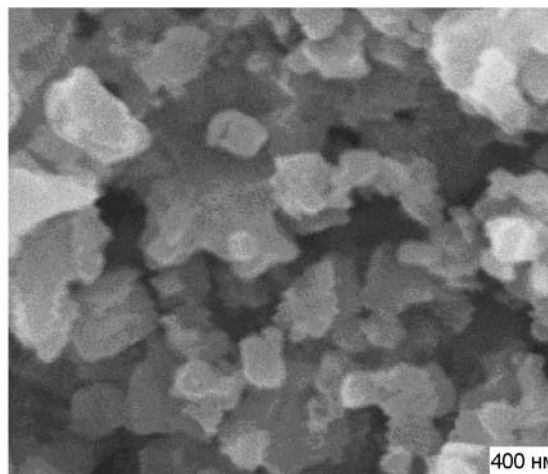


Рис. 10. Кремний после пятиминутной механической обработки

Так как получаемый во всех случаях кремний имел сильнопористую, губчатую структуру с высокой удельной поверхностью, логично было предположить, что можно получить мелкодисперсный (субмикронный — нано!) порошок кремния, если механически разрушить тонкие мостики каркаса. В результате 5-минутной обработки в высокоэнергетической мельнице (Glen Mills Inc., USA) был получен субмикронный порошок кремния с размерами частиц около 300 нм (рис. 10).

ОБРАЗОВАНИЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ Al₂O₃ ПРИ СВС В СИСТЕМЕ Al—B₂O₃—Cr₂O₃

В [28] проведен СВС в системах Cr₂O₃—B₂O₃—Al и Cr₂O₃—B₂O₃—Mg.

Методом рентгенофазового анализа иден-

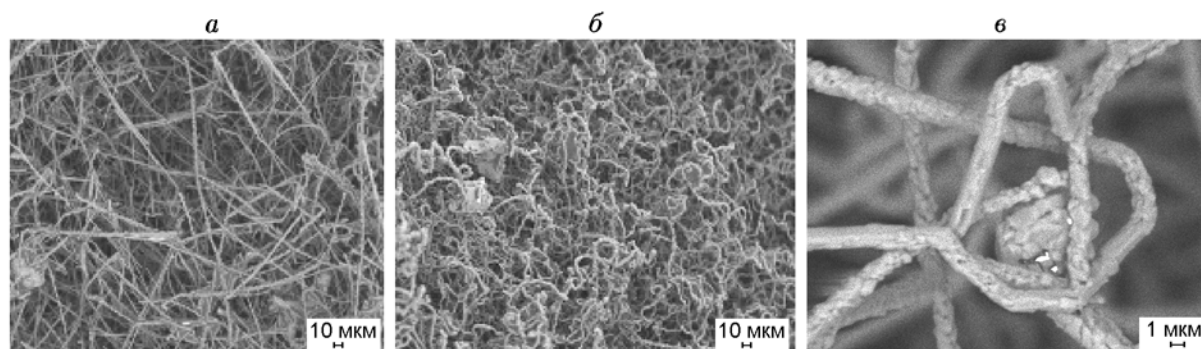


Рис. 11. СЭМ-снимки системы $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{—B}_2\text{O}_3\text{—Al}$:

a — нитевидные кристаллы (усы) из оксида алюминия, *б* — прямая, волнистая и скрученная формы нитевидных кристаллов, *в* — разветвление нескольких кристаллов

тифицированы бориды хрома и оксид алюминия. Видно, что незначительная часть алюминия взаимодействовала с воздухом с образованием AlN .

Результаты электронно-микроскопического исследования продуктов горения системы $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{—B}_2\text{O}_3\text{—Al}$ свидетельствуют об образовании нитевидных кристаллов различных размеров и форм из оксида алюминия в боридной матрице (рис. 11). На рис. 11, *a, б* видны волокна прямой, скрученной и волнистой форм, на рис. 11, *в* — нитевидные кристаллы, имеющие разветвленную структуру. Анализ на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) показал образование волокон $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ длиной около $l \approx 10 \div 25$ мкм и диаметром $d = 200 \div 500$ нм. Волокна не упорядочены. Различные диаметры волокон обусловлены самотурбулентностью роста системы, а именно роста температуры, диффузии, скорости химической реакции [27]. Процесс образования и особенности механизма роста усов и волокон оксида алюминия исследованы в работах [29–31]. Алюминий, как следует из приведенной литературы, может служить концентратором роста нитевидных кристаллов, который осуществляется по механизму пар — жидкость — кристалл.

СИНТЕЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ УГЛЕКИСЛОТНОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА В СИНТЕЗ-ГАЗ

Разработаны катализаторы оксидов металлов (CoO , NiO) на основе стеклоткани. Использовалась Na—Si -стеклоткань марки КС-11-ЛА (88) (температурный интервал работы стеклоткани данной марки составляет

Таблица 2
Условия синтеза стеклотканевых катализаторов

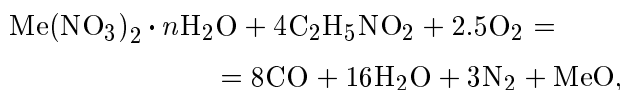
Номер образца	$C_{\text{кат}}$, %	Co/Ni , %	Глицин, моль
ИК1	1.0	100/0	4.0
ИК2	1.0	70/30	4.0
ИК3	1.0	50/50	4.0
ИК4	1.0	30/70	4.0
ИК5	1.0	0/100	4.0

$1000 \div 1200$ °С). Оксиды металлов Ni и Co наносились на ее поверхность методом «solution combustion» (SC) [32], который является одним из вариантов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [33, 34].

Были синтезированы образцы с низким содержанием оксидов — не более 1 % по массе (табл. 2, ИК1–ИК5).

Раствором из азотнокислых солей кобальта, никеля и глицина пропитывали стеклоткань размером 5×5 см с учетом ее влагоемкости, затем образец подсушивали в течение 30 мин на воздухе при температуре 100 °С. Как показали физико-химические исследования, образование наночастиц размером $10 \div 50$ нм происходило при прокаливании образцов в термостате при температуре $400 \div 450$ °С в течение 1 ч, что сопровождалось (в случае использования концентраций активного компонента ≥ 1 %) слабаразличимым голубоватым свечением.

Метод SC между исходными компонентами соответствует реакции



где $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$ — глицин, выступающий в роли восстановителя. Дополнительный недостающий кислород поступает из воздуха.

Исследование поверхности стеклотканевого образца методами СЭМ и ПЭМ (просвечивающий электронный микроскоп) показало, что активный компонент диспергирован в основном в виде отдельных частиц размером порядка 10 нм и меньше, которые образуют оксидную пленку.

На рис. 12,а представлено трехмерное изображение отдельных частиц катализатора 1.0-КС-0/100, взятых с подложки с помощью ультразвукового диспергатора.

ПЭМ-снимок катализатора 0.8-КТ-60/40 (рис. 12,б) показал присутствие частицы кобальта и никеля размером $5 \div 20$ нм на поверхности стеклоткани.

В связи с ежегодным снижением запасов нефти в мире возникает острая необходимость в новых источниках альтернативного чистого

топлива. В качестве такого может выступать диметилловый эфир, получаемый из синтез-газа методом углекислотной конверсии метана. Среди исследованных каталитических систем, используемых в углекислотной конверсии метана и других углеводородов, известны нанесенные никелевые ($\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$, Ni/SiO_2 и Ni_3Al) и кобальт-никелевые катализаторы, соосажденные Ni—Mg контакты ($\text{Ni}_{0.03}\text{Mg}_{0.97}\text{O}$), катализаторы на основе благородных металлов.

Изучены зависимости конверсии исходных веществ, метана и углекислого газа, а также выхода целевых продуктов реакции (водорода и монооксида углерода) от температуры и времени катализа. Образец ИК1 показал достаточно высокую активность: установлено, что выход синтез-газа достигает 32 % H_2 и 46 % CO при температуре 745 °С. Конверсия CH_4 составляет 30 %, CO_2 — 80 % при этой же температуре.

Образцы катализаторов с нанесенным оксидом кобальта проявляют высокую активность в реакции углекислотной конверсии метана. Следует отметить, что в сравнении с промышленным катализатором ГИАП-18 стеклотканевый катализатор ИК1 зауглероживается значительно медленнее, и после 3 ч работы степень зауглероженности для ИК1 не превышала 0.5 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтез в пламени фуллеренов и углеродных нанотрубок представляет собой альтернативу существующим методам синтеза в электрической дуге из графита. СВС нанопорошков оксидов металлов и катализаторов является альтернативой общепринятой технологии получения неорганических веществ и материалов.

Все эти процессы отличаются использованием химической энергии процессов горения вместо электрической; простотой оборудования, благодаря отсутствию внешних источников тепла; большой скоростью процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов Н. Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. — М.: Изд-во АН СССР, 1954.
2. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980.

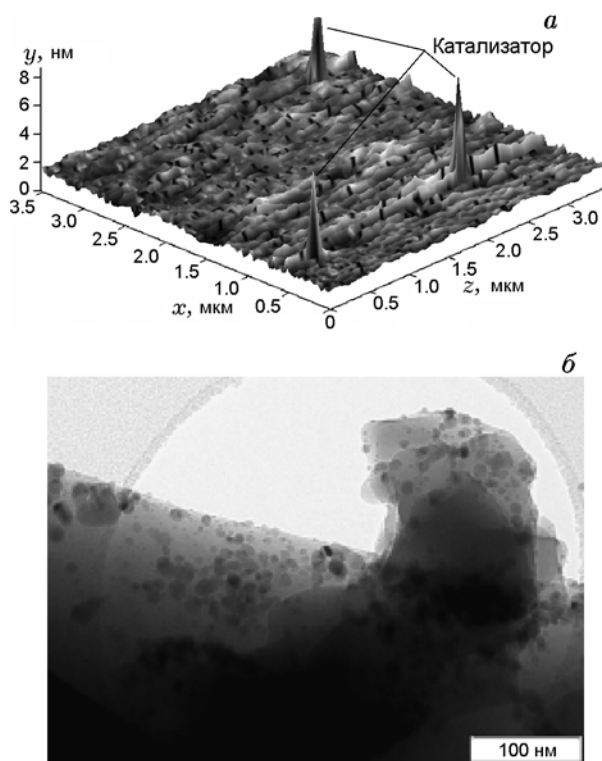


Рис. 12. Трехмерное изображение частиц катализатора 1.0-КС-0/100 (а), полученное на атомно-силовом микроскопе, и ПЭМ-снимок катализатора 0.8-КТ-60/40 (б)

3. **Франк-Каменецкий Д. А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1967.
4. **Ксандопуло Г. И., Дубинин В. В.** Химия газофазного горения. — М.: Химия, 1987.
5. **Мержанов А. Г.** Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов // *Успехи химии*. — 2003. — Т. 72, № 4. — С. 323–345.
6. **Drexler K. E.** Nanosystems: molecular machinery, manufacturing and computation. — New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
7. **Нанотехнологии.** Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения / под ред. П. П. Мальцева. — М.: Техносфера, 2008.
8. **Smith W. F., Hashemi J.** Foundations of materials science and engineering. — 5th ed. — McGraw-Hill, 2010.
9. **Oberlin A., Endo M., Koyama T.** Filamentous growth of carbon through benzene decomposition // *Cryst. Growth*. — 1976. — V. 32, N 3. — P. 335–349.
10. **Iijima S.** Helical microtubules of graphitic carbon // *Nature*. — 1991. — V. 354. — P. 56–58.
11. **Endo M., Strano M. S., Ajayan P. M.** Potential applications of carbon nanotubes / A. Jorio, G. Dresselhaus, M. S. Dresselhaus (Eds). — 2008. — P. 13–61. — (Topics in Appl. Phys.; V. 111).
12. **Mansurov Z. A.** Some applications of nanocarbon materials for novel devices // *Nonoscale-Devices — Fundamentals* / R. Gross et al. (Eds). — Springer, 2006. — P. 355–368.
13. **Сычев А. Е., Мержанов А. Г.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез наноматериалов // *Успехи химии*. — 2004. — Т. 73, № 2. — С. 157–170.
14. **Kroto H. W., Heath J. R., O'Brien S. C., Curl R. F., Smalley R. F.** C₆₀: Buckminsterfullerene // *Nature*. — 1985. — V. 318, N 6042. — P. 162–164.
15. **Howard J. B.** Fullerenes formation in flames // 24th Symp. (Intern.) on Combustion. — 1992. — P. 933–946.
16. **Krätschmer W., Lamb L., Fostiropoulos K., Huffman D.** Solid C: a new form of carbon // *Nature*. — 1990. — V. 347. — P. 354–358.
17. **Jäger C., Huiskens F., Jansa I. Lamas, Henning Th.** Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and carbonaceous solids in gas-phase condensation experiments // *Astrophys. J.* — 2009. — N 696. — P. 706–712.
18. **Ahrens J., Bachmann M., Baum Th., Griesheimer J., Kovacs R., Weilmünster P., Homann K.-H.** Fullerenes and their ions in hydrocarbon flames // *Intern. J. of Mass Spectrometry and Ion Processes*. — 1994. — V. 138. — P. 133–148.
19. **Grieco W. J., Lafleur A. L., Swallow K. C., et al.** Fullerenes and PAH in low-pressure premixed benzene/oxygen flames // *Symp. (Intern.) on Combustion*. — 1998. — V. 27, N 2. — P. 1669–1675.
20. **Mansurov Z. A., Prikhodko N. G., Mashan T. T., Lesbaev B. T.** The study of influence of electric field on soot formation at low pressure // *Хим. физика*. — 2006. — Т. 25, № 10. — С. 18–22.
21. **Bachman M., Wiese W., Homann K.-H.** Thermal and chemical influences on the soot mass growth // *Symp. (Intern.) on Combustion*. — 1994. — V. 25, N 1. — P. 635–643.
22. **Приходько Н. Г.** Особенности образования фуллеренов и нанотрубок при горении углеводородов в электрическом поле: дис... д-ра хим. наук / КазНУ им. аль-Фараби. — Алматы, 2010.
23. **Merchan-Merchan W., Saveliev A. V., Kennedy L. A.** High-rate flame synthesis of vertically aligned carbon nanotubes using electric field control // *Carbon*. — 2004. — V. 42. — P. 599–608.
24. **Ченчик Д. И., Мансуров З. А., Шабанова Т. А., Орыншаих Т.** Получение углеродных нанотрубок в горелке на встречных струях // *Международ. симпоз. «Горение и плазмохимия»*. — Алматы, 2007. — С. 288–290.
25. **Нажипкызы М., Мансуров З. А., Пури И. К., Шабанова Т. А., Цыганова И. А.** Получение супергидрофобной углеродной поверхности при горении пропана // *Нефть и газ*. — 2010. — № 5 (59). — С. 27–33.
26. **Levesque A., Binh V. T., Semet V., Guillot D., Filit R. Y., Brookes M. D., et al.** Mono disperse carbon nanopearls an a foam-like arrangement: a new carbon nano-compound for cold cathodes // *Thin Solid Films*. — 2004. — N 464–465. — P. 308–14.
27. **Yermekova Zh., Mansurov Z., Mukasyan A. S.** Combustion synthesis of silicon nanopowders // *Intern. J. Self-Propagating High-Temperature Synth.* — 2010. — V. 19, N 2. — P. 96–103.
28. **Абдулкаримова Д. С., Вонгай И. М., Мансуров З. А., Одавара О.** Получение боридных композитов методом СВС // *Международ. симпоз. «Физика и химия углеродных материалов/Наноинженерия»*. — Алматы, 2010. — С. 116–118.
29. **Chen H., Cao Y., Xiang X., Li J., Ge C.** Fabrication of β -Si₃N₄ nano-fibers // *J. Alloys and Compounds*. — 2001. — V. 325, N 1-2. — P. L1–L3.
30. **Longland P. L., Moulson A. I.** The growth of α - and β -Si₃N₄ accompanying the nitriding of silicon powder compacts // *J. Mater. Sci.* — 1978. — V. 13, N 10. — P. 2279–2280.
31. **Valcárcel V., Souto A., Guitián F.** Development of single-crystal α -Al₂O₃ fibers by vapor — liquid — solid deposition (VLS) from aluminum and powder silica // *Adv. Mater.* — 1998. — V. 10, N 2. — P. 138–140.

32. **Aldashukurova G. G., Shikina N. V., Mironenko A. V., Mansurov Z. A., Ismagilov Z. R.** Catalysts for processing light hydrocarbon raw stock: combustion synthesis and characterization // Intern. J. Self-Propagating High-Temperature Synth. — 2011. — V. 20, N 2. — P. 124(4).
33. **Mykasyan A. S., Dinka P.** Novel approaches to solution — combustion synthesis // Intern. J. Self-Propagating High-Temperature Synth. — 2007. — V. 16, N 1. — P. 23–35.
34. **Reddy B. M., Reddy G. K., Ganesh I., Ferreira Jose M. F.** Single step synthesis of nano-sized $\text{CeO}_2\text{—M}_x\text{O}_y$ mixed oxides ($\text{M}_x\text{O}_y = \text{SiO}_2, \text{TiO}_2, \text{ZrO}_2, \text{and Al}_2\text{O}_3$) by microwave induced solution combustion synthesis: characterization and CO oxidation // J. Mater. Sci. Lett. — 2009. — V. 44, N 11. — P. 2743–2751.

*Поступила в редакцию 18/I 2012 г.,
в окончательном варианте — 6/II 2012 г.*
