

УДК 537.52:542.9:661.66

**Н. И. КУСКОВА, Д. И. ЧЕЛПАНОВ, А. Н. КОРЗИНОВА****САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ  
МЕТАЛЛОУГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ**

Реализовано процесси високотемпературного синтезу (СВС) металовуглецевих наноматеріалів у хвилі горіння, яку ініціює разрядноімпульсний струм. Обрана екзотермічна система «алюміній + титан + політетрафторетилен» для СВС карбіду титану у процесі протікання сполучених екзотермічних реакцій з утворенням наноструктурного порошку карбіду титану. Обрана екзотермічна система «вольфрам + титан + вуглець» для отримання нанорозмірних карбідів вольфраму і титану, в якій в якості джерела вуглецю використовуються порошки вуглецевих наноматеріалів, синтезовані методом електророзрядної обробки вуглеводнів.

**Ключові слова:** самопоширюваний високотемпературний синтез, разрядноімпульсне ініціювання, карбід титану, карбід вольфраму, вуглецевий нанокристалічний матеріал.

Реализованы процессы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) металлоуглеродных наноматериалов в волне горения, инициируемой разрядноимпульсным током. Выбрана экзотермическая система «алюминий + титан + политетрафторэтилен» для СВС карбида титана в процессе протекания сопряженных экзотермических реакций с образованием наноструктурного порошка карбида титана. Выбрана экзотермическая система «вольфрам + титан + углерод» для получения наноразмерных карбидов вольфрама и титана, в которой в качестве источника углерода используются порошки углеродных наноматериалов, синтезированные методом электроразрядной обработки углеводородов.

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, разрядноимпульсное инициирование, карбид титана, карбид вольфрама, углеродный нанокристаллический материал.

Processes of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) of metal-carbon nanomaterials in a combustion wave initiated by a pulse discharge current are realized. Exothermic systems for SHS of metallocarbon nanomaterials are chosen. Powder mixture "aluminum + titanium + polytetrafluoroethylene" is proposed to use for SHS of titanium carbide via series of conjugated exothermic reactions. It is shown that nanostructured titanium carbide powder with nanocrystallites' size of 35 nm is formed as a result of combustion of the mixture. Carbon nanomaterial powders which were synthesized by the electrodischarge processing of hydrocarbons are used to synthesize carbides of tungsten and titanium in the "tungsten + titanium + carbon" system with nanocrystallites' size of 48.8 nm for TiC, 46 nm for W<sub>2</sub>C and 20.7 nm for WC.

**Keywords:** self-propagating high-temperature synthesis, pulse discharge initiation, titanium carbide, tungsten carbide, carbon nanocrystalline material.

**Введение**

Значительный интерес научного сообщества к исследованию способов получения, структуры и свойств наноразмерных систем обусловлен многообразием вариантов их практического применения. Малый размер структурных составляющих (до 100 нм) определяет значительные различия в свойствах наноматериалов по сравнению с их макроаналогами [1-3].

Развитие промышленности требует новых подходов к созданию технологий, в которых активно синтезируются и применяются новые металлоуглеродные наноматериалы. Высокая востребованность металлоуглеродных наноматериалов обуславливается разнообразием их физико-химических свойств и значительным потенциалом в направлении улучшения их потребительских характеристик.

Одной из проблем в производстве металлоуглеродных наноматериалов является получение различных углеродных добавок, способных заменить дорогостоящий углерод. Так, в качестве углеродного компонента при синтезе материалов по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) используют различные виды сажи, графитовый порошок. Активная форма углеродной добавки и ее равномерное распределение по объему шихтовой СВС-смеси – необходимые условия для получения

качественного продукта. Поэтому поиск новых перспективных заменителей углерода для получения металлоуглеродных наноматериалов остается актуальным.

Одной из наиболее активных форм углерода является углеродный нанокристаллический материал (УНМ). Наноструктурированные модификации углерода, относящиеся к сравнительно недавно открытым классам веществ, находят все более широкое применение в различных направлениях химической промышленности, индустрии конструкционных и строительных материалов, системах обеспечения безопасности, электроники, медицины. УНМ могут быть использованы и для получения металлоуглеродных наноматериалов в СВС-процессах.

Технологические достоинства СВС заложены в самом принципе – использование быстро выделяющегося тепла химических реакций вместо нагрева вещества от внешнего источника, поэтому многие СВС-процессы даже в простейшем варианте успешно конкурируют с традиционными энергоемкими технологиями. Однако по мере развития метода и технологий СВС к ним предъявляются все более сложные требования с целью получения максимального эффекта.

В настоящее время в области СВС ведутся перспективные работы по синтезу нанопорошков и наноматериалов, прямому синтезу монокристаллов, полу-

чению керамических и металлокерамических пеноматериалов, созданию композиционных материалов типа полимер-керамика, синтезу сверхтвердых материалов.

Закономерности и механизм СВС наиболее удобно исследовать на примере горения самых простых экзотермических систем, состоящих из одних химических элементов (безгазовые системы). Для безгазовых систем исходные компоненты, промежуточные и конечные продукты находятся в конденсированном состоянии, то есть отсутствуют газообразные продукты сгорания, поэтому скорость горения не зависит от внешнего давления.

Известно, что метод СВС является энергосберегающим и высокопроизводительным способом получения качественных порошков карбидов. При использовании в твердых сплавах порошков карбидов с ультрадисперсной и нанокристаллической структурой можно существенно увеличить твердость, прочность и вязкость сплава.

### Анализ предварительных исследований и литературы

Широкое применение для получения ценных в практическом отношении композитов металлов [4], карбидов [5], боридов [6], нитридов, оксидов и гидридов [7] нашел самораспространяющийся высокотемпературный синтез. СВС-метод основан на

химических реакциях, протекающих внутри узкой высокотемпературной зоны (от 1000 до 4000 К), которая распространяется в исходной системе порошков, состоящей из мелкодисперсной фракции окислителя и восстановителя [8].

Экспериментально установлено, что СВС относится к трудно инициируемым процессам горения. Температура и энергия зажигания этих систем превосходят таковые для известных конденсированных взрывчатых веществ и порохов.

После инициирования и некоторого переходного периода устанавливается определенный режим распространения реакции. В большинстве случаев этот режим, характеризующийся постоянством линейной скорости перемещения фронта, близкий к стационарному. Интервал изменения скоростей горения для разных систем составляет от долей миллиметра в секунду (медленногорящие) до десятков сантиметров в секунду (быстрогорящие).

Размер частиц в продуктах СВС составляет обычно от 1 до 5 мкм, поэтому предполагалось, что получить этим методом вещества в нанокристаллическом состоянии нельзя. В 2002 г. было предложено осуществлять синтез нанопорошков карбида титана в результате использования инертного разбавителя, предотвращающего рост образующихся частиц карбида вследствие образования тонкого слоя расплава соли. Синтезированный с использованием в качестве разбавителя NaCl (при оптимальном содержании массовой доли ~ 30 %) порошок карбида имеет средний размер частиц ~ 100 нм. Недостатком метода является необходимость отмывания NaCl [9, 10].

Традиционная технология СВС карбида титана основана на нефльтрационном сжигании шихты -

исходной смеси порошков титана и сажи - в насыпном виде или в виде прессованных брикетов (таблеток) в замкнутом реакторе, в результате чего происходит значительный рост давления в реакторе и получается сильно спеченная прочная масса карбида титана. Такой спеченный продукт горения трудно поддается дроблению и размолу в порошок, особенно в порошок высокой дисперсности.

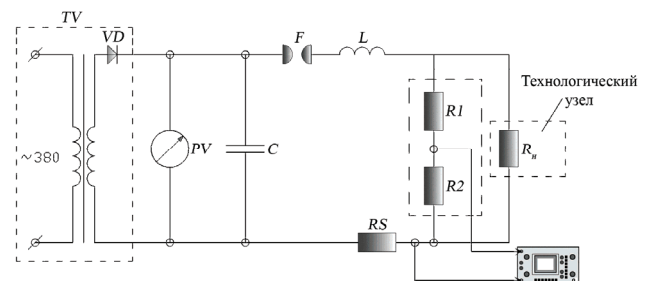
Для получения высокодисперсного порошка карбида титана применяют способ получения тугоплавких соединений на основе процесса СВС с фильтрацией газов и использованием гранулированной шихты. Это позволяет значительно снизить давление в реакторе, сделать процесс СВС более безопасным и получить высокопористый слабоспеченный продукт, который легко размалывается в микропорошок.

Кроме того, для увеличения дисперсности синтезируемого порошка карбида титана до наноразмерного используют различные специальные добавки в шихту, которые предотвращают рост синтезируемых карбидных частиц.

**Цель работы** – целенаправленное получение металлоуглеродных наноматериалов в результате разрядноимпульсного инициирования СВС в экзотермических системах, содержащих наноразмерные реагенты.

### Методика исследований

Для исследования процесса разрядноимпульсной инициации СВС нами был применен соответствующий электроразрядный контур (рис. 1) [11].



*TV* – высоковольтный трансформатор с выпрямителем *VD*; *PV* – киловольтметр; *C* – батарея конденсаторов; *F* – управляемый воздушный разрядник; *L* – катушка индуктивности; *RS* – измерительный шунт; *R1, R2* – делитель напряжения; *R<sub>n</sub>* – инициирующая проволока

Рисунок 1 – Электроразрядный контур для инициирования СВС

Подготовленную из порошковых реагентов шихту (спрессованную до определенной плотности или помещенную в капсулу, внутренний диаметр которой от 3 до 30 мм и больше) располагают в технологическом узле в специальной ячейке.

К торцу образца подводят инициирующую проволоку в виде спирали, предварительно закрепленной в токоведущих электродах.

Для нагрева экзотермических смесей была использована вольфрамовая проволока радиусом 0,3 мм.

Иницирование волны горения реализуется кратковременным импульсом тока (локальный нагрев экзотермической смеси разрядным импульсом тока, текущего по проволоке) [12].

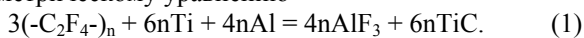
Для реализации процесса СВС порошки металлов с размером частиц менее 50 мкм и углеродсодержащие вещества или УНМ смешивали до однородного состояния.

УНМ получали методом разрядноимпульсной обработки керосина (ТС-1). Порошковые смеси засыпали в кварцевые или политетрафторэтиленовые трубки.

Эксперименты проводили в нормальных условиях при атмосферном давлении

Для реализации СВС карбида титана в качестве источника углерода нами была выбрана экзотермическая система порошковых реагентов алюминий + политетрафторэтилен ( $Al + (-C_2F_4)_n$ ).

Нами предложен метод СВС карбида титана в сопряженных экзотермических реакциях в системе « $Al + Ti + (-C_2F_4)_n$ ». Порошковую смесь для СВС готовили с учетом соотношения реагентов согласно стехиометрическому уравнению



Предполагалось, что в момент инициации процесса СВС политетрафторэтилен вступает в экзотермическую реакцию с алюминием с образованием нанокластеров углерода, которые впоследствии вступают в последующую реакцию с титаном с образованием карбида титана. Образующийся побочный продукт (фторид алюминия) в дальнейшем удалялся растворением СВС продукта в плавиковой кислоте.

По нашим сведениям, к настоящему моменту синтез карбида вольфрама методом СВС по реакции  $W + C = WC$  не реализуется из-за термодинамических ограничений. Поэтому применяют модифицированные методы СВС карбида вольфрама с добавлением в порошковую систему дополнительных реагентов для реализации экзотермического горения смеси.

Реализацию экзотермического СВС-горения порошковых смесей « $W + C$ » достигали добавлением порошков титана (от 20 до 50 мас. %) и политетрафторэтилена (5 мас. %) в исходную порошковую смесь. С целью получения наноразмерной фракции результирующих порошков карбидов, был использован источник углерода соответствующей размерности – синтезированные электроразрядной обработкой углеводородов порошки УНМ.

Образцы для реализации СВС готовили из смеси порошков соотношением реагентов, соответствующим стехиометрическому уравнению химической реакции  $kW + mTi + C = kW C + mTiC$ ,  $k+m = 1$ . (2)

Рентгенофазовый анализ полученных металлоуглеродных наноматериалов выполнен в Институте металлофизики НАН Украины.

Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) нанокристаллов синтезированных фаз определяли по формуле Шеррера [13]

$$d = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos\left(\frac{2\theta}{2}\right)}, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр наночастицы, нм;  $\beta$  – ширина рентгеновского максимума на полувысоте, рад.;  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения, нм;  $k$  – константа Шеррера, безразм.

## Результаты эксперимента

Плотности подготовленных порошковых смесей, при которых происходит зажигание СВС металлоуглеродных наноматериалов, составляют от 1500 до 2000 кг/м<sup>3</sup>.

При введенной в иницирующей проводник мощности менее 0,1 МДж/(м<sup>2</sup>·с) волна горения не образуется. Зажигание СВС в этом случае реализовали при нагревании порошковой смеси до температуры 500 К или при использовании экзотермической добавки (политетрафторэтилена).

Системы металл - углерод характеризуются широкими областями гомогенности фаз карбида, а также наличием относительно низкотемпературных эвтектик. Адиабатическая температура горения равна температуре плавления карбида титана и превышает температуры плавления металлов. Таким образом, в волне горения процесс реагирования идет через растворение углерода в расплаве металла с кристаллизацией фазы карбида из расплава, т. е. первой образующейся фазой твердого продукта является монокарбид.

Согласно (1), реализация СВС карбида титана представляет собой процесс протекания двух сопряженных экзотермических реакций – синтеза углерода и карбида титана. Сначала происходит плавление алюминия, затем протекает экзотермическая реакция образования фторида алюминия с одновременным синтезом аморфного углерода. Далее нанокластеры углерода реагируют с титаном и образуется карбид титана.

Результаты рентгенофазового анализа показали, что исходные порошки металлов и политетрафторэтилена вступили в СВС-реакцию, продуктами которой является порошковая смесь карбида титана и фторида алюминия (рис. 2).

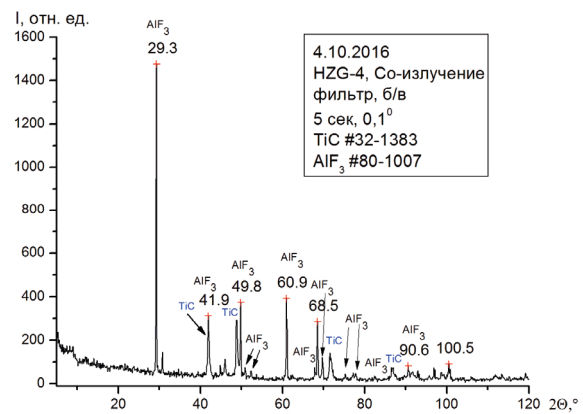


Рисунок 2 – Дифрактограмма СВС-продукта системы « $Al + Ti + (-C_2F_4)_n$ »

Карбид титана имеет кубическую форму (пространственная группа  $Fm-3m$ ). По дифрактограмме рассчитаны ОКР, значения которых позволяют оценить размеры нанокристаллитов карбида титана  $d \approx 35$  нм. Максимум пика, на основании которого рассчитывали ОКР - 48,8°.

Таким образом, в процессе горения смеси «алюминий + титан + политетрафторэтилен» происходит синтез наноструктурного порошка карбида титана.

Удаление побочного вещества (фторида алюми-

ния) осуществляется при растворении СВС-продукта в плавиковой кислоте или при нагревании порошка в вакууме до температуры возгонки фторида алюминия (1580 К). Нагревание порошка позволяет удалить также свободный углерод, содержание которого в СВС-продукте менее 10 %.

Температура плавления СВС карбида титана совпадает с измеренной температурой горения 3370 К.

Реализацию СВС карбидов тугоплавких металлов проводили в системе «вольфрам + титан + УНМ». Состав компонентов смеси выбирали в соответствии со стехиометрическими соотношениями уравнения (3):

$$1) k = m = 0,5 (W : Ti : C = 0,5 : 0,5 : 1);$$

$$2) k = 0,8; m = 0,2 (W : Ti : C = 0,8 : 0,2 : 1).$$

Результаты рентгенофазового анализа показали, что исходные порошки металлов и нанокристаллического углерода вступили в СВС-реакцию и образовали смеси карбидов титана и вольфрама: TiC, WC и W<sub>2</sub>C (рис. 3).

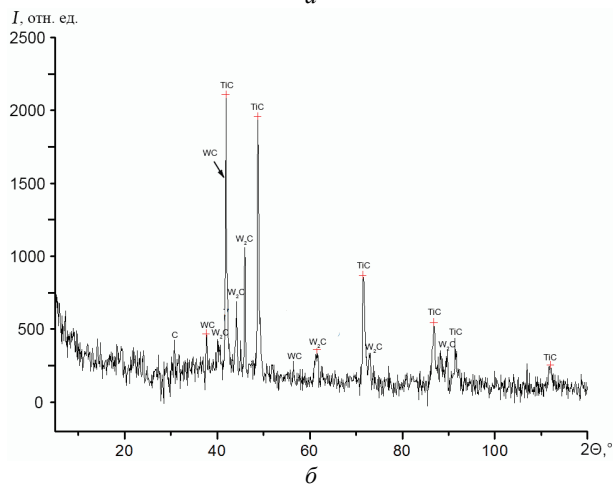
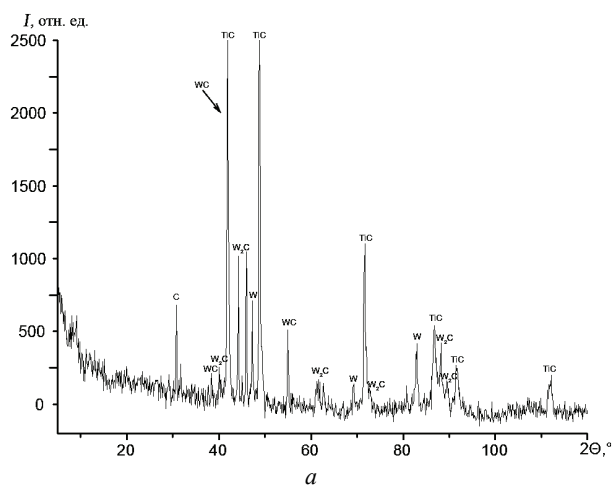


Рисунок 3 – Дифрактограммы СВС-продуктов системы «W + Ti + C» для составов исходной смеси:

a – W : Ti : C = 0,5 : 0,5 : 1; б – W : Ti : C = 0,8 : 0,2 : 1

Синтез кристаллитов W<sub>2</sub>C гексагональной формы (пространственная группа P-3m1) происходит благодаря взаимодействию вольфрама с углеродом при температурах от 3300 до 3500 К [14].

Адиабатическая температура горения системы «титан+углерод» близка к температуре плавления карбида титана и превышает температуру плавления титана. Таким образом, реакция протекает путем растворения уг-

лерода в расплаве металла с кристаллизацией фазы карбида титана из расплава [15]. Теплота реакции образования карбида титана (~225 Дж/моль) расходуется на поддержание реакции синтеза карбида вольфрама.

Наличие остаточного углерода и вольфрама (рис. 3, а) может быть связано с нарушением стехиометрического соотношения между компонентами порошковой смеси ввиду образования карбида W<sub>2</sub>C, которое не учитывалось в предполагаемой химической реакции (3).

Увеличение количества вольфрама в смеси приводит к уменьшению остаточного углерода и вольфрама в СВС-продукте и, соответственно, к увеличению содержания карбида WC гексагональной формы (пространственная группа P-6m2) (рис. 3).

По дифрактограммам для продуктов СВС: WC, W<sub>2</sub>C и TiC рассчитаны размеры кристаллитов. Максимумы пиков, на основании которых рассчитывали ОКР: 48,8° для TiC, 46,1° для W<sub>2</sub>C, 35° и 48° для WC. Получены следующие значения размеров наночастиц: для карбида титана – 48,8 нм, для W<sub>2</sub>C – 46 нм, для WC – 20,7 нм.

Использование УНМ, синтезированных в процессе электроразрядной обработки углеводородов [16], позволяет получать наноструктурные порошки карбидов вольфрама и титана без использования механохимической обработки исходной смеси.

Синтезированный СВС-продукт представляет собой спекшийся порошок серого цвета с металлическим отблеском с насыпной плотностью 103 кг/м<sup>3</sup>.

Удельная электрическая проводимость смеси синтезированных карбидов равна 4·10<sup>3</sup> См/м при плотности 2·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>.

## Выводы

Выбраны экзотермические системы для синтеза металлоуглеродных наноматериалов.

Экспериментально исследованы условия разрядно-импульсного инициирования СВС-процессов: мощность зажигания СВС разрядными импульсами тока на единицу площади поверхности образца – от 0,1 до 1 МДж/(м<sup>2</sup>·с), плотности подготовленных порошковых смесей, при которых происходит зажигание СВС, составляют от 1500 до 2000 кг/м<sup>3</sup>.

Для синтеза карбидов предложено использовать углеродные наноматериалы, синтезированные методом электроразрядной обработки углеводородов.

Предложено использовать порошковую смесь «алюминий + титан + политетрафторэтилен» для СВС карбидов в процессе протекания сопряженных экзотермических реакций. В результате горения смеси «алюминий + титан + политетрафторэтилен» происходит образование наноструктурного порошка карбида титана (размер ОКР нанокристаллитов, рассчитанный по дифрактограмме, – 35 нм).

Реализацию СВС карбидов тугоплавких металлов проводили в системе «вольфрам + титан + УНМ». Показано, что увеличение содержания вольфрама в смеси от 50 % до 80 % приводит к уменьшению непрореагировавших углерода и вольфрама и, соответственно, к увеличению содержания карбида WC в СВС-продукте.

По дифрактограммам рассчитаны размеры ОКР кристаллитов: TiC – 48,8 нм, W<sub>2</sub>C – 46 нм и WC –

20,7 нм. Использование углеродных наноматериалов позволяет получать наноструктурные порошки карбидов вольфрама и титана без предварительной механической обработки исходной смеси.

#### Список литературы:

1. Drexler K. E. Nanosystems: molecular machinery, manufacturing and computation / K. E. Drexler. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
2. Нанотехнологии. Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения / Под ред. П. П. Мальцева. – М.: Техносфера, 2008.
3. Smith W. F. Foundations of materials science and engineering / W. F. Smith, J. Hashemi. – 5th Edition McGraw-Hill, 2010. – 1056 p.
4. Garret W. Die castable Aluminum Metal Matrix Composites by Self-propagating High-temperature Synthesis / W. Garret, J. Nuechterlein, I. Jo, A. Munitz, M. J. Kaufman and J. J. Moore // Society of Die Casting Engineers. – 2012. – Vol. 55. – P. 71-78.
5. Garret W. Control of Self-propagating High-temperature Synthesis Derived Aluminum-Titanium Carbide Metal Matrix Composites, Golden: PhD thesis / W. Garret. – Colorado School of Mines. – 2012. – P. 160-170.
6. Абдулкаримова Д. С. Получение боридных композитов методом СВС / Д. С. Абдулкаримова, И. М. Вонгай, З. А. Мансуров, О. Одавара // Межд. симпозиум «Физика и химия углеродных материалов / Наноинженерия», Алматы. – 2010. – С. 116-118.
7. Varma A. Combustion synthesis of advanced materials: principles and applications / A. Varma, A. Rogachev, A. Mukasyan, et al. // Advanced Chemical Engineering. – 1998. – Vol. 24. – P. 78-226.
8. Bystrzejewski M. Self-sustaining high-temperature synthesis of carbon-encapsulated magnetic nanoparticles from organic and inorganic metal precursors / M. Bystrzejewski, M. Szala, W. Kicinski, W. Kaszuwara, M.H. Rummeli, T. Gemming, A. Huczko // New Carbon Materials. – Apr., 2010. – Vol. 25. – № 2. – P. 81-88.
9. Мержанов А. Г. Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов / А. Г. Мержанов // Успехи химии. – 2003. – Т. 72, № 4. – С. 323-412.
10. Ремпель А. А. Нанотехнологии, свойства и применение наноструктурированных материалов / А. А. Ремпель // Успехи химии. – 2007. – Т. 76, № 5. – С. 474-499.
11. Челпанов Д. І. Пат. 104443, Украина Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів / Д. І. Челпанов, Н. І. Кускова, А. О. Смально. – 2016.
12. Челпанов Д. І. Условия разрядноимпульсного инициирования и параметры процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза углеродных наноматериалов / Д. І. Челпанов, В. Ю. Бакларь, Н. І. Кускова, А. Н. Корзинова // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. праць. – 2016. – № 51. – С. 115-120.
13. Альмяшева О. В. Размер, морфология и структура частиц нанопорошка диоксида циркония, полученного в гидротермальных условиях / О. В. Альмяшева, Б. А. Федорова, А. В. Смирнов, В. В. Гусаров // Наносистемы: Физика, Химия, Математика. – 2010. – Т. 1, № 1. – С. 26 - 36.
14. Huczko A. Combustion synthesis as a novel method for production of 1-D SiC nanostructures / A. Huczko, M. Bystrzejewski, H. Lange, et al. // Journal of Physical Chemistry B. – 2005. – Vol. 109. – P. 16244-16251.
15. Huczko A. A self-assembly SHS approach to form silicon carbide nanofibers / A. Huczko, M. Osica, A. Rutkowska, et al. // Journal of Physics: Condensed Matter. –

2007. – Vol. 19. – P. 395022.

16. Нажишкызы М. Получение супергидрофобной углеродной поверхности при горении пропана / М. Нажишкызы, З. А. Мансуров, И. К. Пури, Т. А. Шабанова, И. А. Цыганова. – Нефть и газ. – 2010 – №5(59). – С. 27-33.

#### References (transliterated):

1. Drexler K. E. Nanosystems: molecular machinery, manufacturing and computation. N. Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1992. 576 p.
2. Mal'cev P. P., ed. Nanotehnologii. Nanomaterialy. Nanosistemnaja tehnika. Mirovye dostizhenija [Nanotechnologies. Nanomaterials. Nano-system engineering. World achievements]. – Moscow, Tehnosfera Publ., 2008.
3. Smith W. F. Foundations of materials science and engineering. 5th Edition McGraw-Hill, 2010. 1056 p.
4. Garret W., Nuechterlein J., Jo I., Munitz A., Kaufman M. J. and Moore J. J. Die castable Aluminum Metal Matrix Composites by Self-propagating High-temperature Synthesis. Society of Die Casting Engineers. 2012. Vol. 55. P. 71-78.
5. Garret W. Control of Self-propagating High-temperature Synthesis Derived Aluminum-Titanium Carbide Metal Matrix Composites, Golden. PhD thesis. Colorado School of Mines, 2012. P. 160-170.
6. Abdulkarimova D. S., Vongaj I. M., Mansurov Z. A., Odavara O. Poluchenie boridnyh kompozitov metodom SVS [Production of boride composites by the SHS method]. Mezhd. simpozium «Fizika i himija uglevodnyh materialov/Nanoinzhenerija». Almaty, 2010. P. 116-118.
7. Varma A., Rogachev A., Mukasyan A., et al. Combustion synthesis of advanced materials: principles and applications. Advanced Chemical Engineering. 1998. Vol. 24. P. 78-226.
8. Bystrzejewski M., Szala M., Kicinski W., Kaszuwara W., Rummeli M.H., Gemming T., Huczko A. Self-sustaining high-temperature synthesis of carbon-encapsulated magnetic nanoparticles from organic and inorganic metal precursors. New Carbon Materials. Apr., 2010. Vol. 25, no. 2. P. 81-88.
9. Merzhanov A. G. Protsessy gorenija i vzryva v fizikokhimii i tekhnologii neorganicheskikh materialov [Combustion and explosion processes in physicochemistry and technology of inorganic materials]. Uspekhi khimii. 2003. Vol. 72, no. 4. P. 323-412.
10. Rempel' A. A. Nanotekhnologii, svoystva i primenenie nanostrukturirovannykh materialov [Nanotechnologies, properties and applications of nanostructured materials]. Uspekhi khimii. 2007. Vol. 76, no. 5. P. 474-499.
11. Chelpanov D. I., Kuskova N.I., Smal'ko A. O. Sposib oderzhannya vugletsevikh nanomaterialiv [Method of carbon nanomaterials production]. Patent UA, no. 104443, 2016.
12. Chelpanov D. I., Baklar' V. Yu., Kuskova N. I., Korzinova A. N. Usloviya razryadnoimpul'snogo initsiirovaniya i parametry protsessa samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza uglevodnykh nanomaterialov [Conditions for the pulse discharge initiation and parameters of the process of self-propagating high-temperature synthesis of carbon nanomaterials]. Visnik NTU «KhPI». Ser. Tekhnika ta elektrofizika visokikh naprug: zb. nauk. prats'. 2016. No. 51. P. 115-120.
13. Al'myasheva O. V., Fedorova B. A., Smirnov A. V., Gusarov V. V. Razmer, morfologiya i struktura chastits nanoporoshka dioksida tsirkoniya, poluchennogo v gidrotermal'nykh usloviyakh [Size, morphology and structure of zirconia nanopowder particles obtained under hydrothermal conditions]. Nanosistemy: Fizika, Khimiya, Matematika. 2010. Vol. 1, no. 1. P. 26-36.
14. Huczko A., Bystrzejewski M., Lange H., et al. Combustion synthesis as a novel method for production of 1-D SiC nanostructures. Journal of Physical Chemistry B. 2005. Vol. 109. P. 16244-16251.
15. Huczko A., Osica M., Rutkowska A., et al. A self-

assembly SHS approach to form silicon carbide nanofibers. Journal of Physics: Condensed Matter. 2007, Vol. 19. P. 395022.

16. Nazhipkyzy M, Mansurov Z. A., Puri I. K., Shabanova T. A., Cyganova I. A. Poluchenie supergidrofobnoj

uglerodnoj poverhnosti pri gorenii propane [Preparation of superhydrophobic carbon surface during propane combustion]. Neft' i gaz. 2010. No. 5(59). P. 27-33.

Поступила (received) 27.09.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Самопоширюваний високотемпературний синтез металовуглецевих наноматеріалів / Н. І. Кускова, Д. І. Челпанов, Г. М. Корзинова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 50-55. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

**Самораспространяющийся высокотемпературный синтез металлоуглеродных наноматериалов / Н. И. Кускова, Д. И. Челпанов, А. Н. Корзинова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 50-55. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

**Self-propagating high-temperature synthesis of metal-carbon nanomaterials / N.I. Kuskova, D. I. Chelpanov, A.N. Korzinoва** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 50-55. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Кускова Наталя Іванівна** – доктор технічних наук, професор, зав. відділу електрофізичних досліджень, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

**Кускова Наталья Ивановна** – доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

**Kuskova Natalya Ivanovna** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electrophysical Researches, Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

**Челпанов Дмитро Ілліч** – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

**Челпанов Дмитрий Ильич** – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

**Chelpanov Dmitry Illych** – Postgraduate Student; Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, tel.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

**Корзинова Ганна Миколаївна** – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (093) 227-17-93; email: maluchek@i.ua.

**Корзинова Анна Николаевна** – аспірант; Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (093) 227-17-93; email: maluchek@i.ua.

**Korzinoва Anna Nikolaevna** – Postgraduate Student; Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, tel.: (093) 227-17-93; email: maluchek@i.ua.

УДК 621.317.3

**Ю. С. НЕМЧЕНКО**

**ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ В НИПКИ «МОЛНИЯ» ИСПЫТАНИЙ НА МОЛНИЕСТОЙКОСТЬ ПО СТАНДАРТУ MIL-STD-461G**

Детально розглянуто структуру розділу CS117 (блискавкостійкість) стандарту США на ЕМС військової техніки MIL-STD-461G. Складено детальні таблиці поширення норм випробувань на різні види джгутів і окремих провідників для літаків різної конструкції методом «кабельної інжекції» двома циклограммами випробувальних впливів: «багаторазові удари» і «багаторазові спалахи». Докладно розглянуті можливості застосування існуючих в НДПКІ «Молнія» генераторів на блискавкостійкість типу ИГЛА, а також методику їх доопрацювання під норми стандарту MIL-STD-461G.

**Ключові слова:** випробування, блискавкостійкість, бортове авіаційне обладнання, багаторазові удари, багаторазові спалахи, норми випробувань.

Подробно рассмотрена структура раздела CS117 (молниестойкость) стандарта США на ЭМС военной техники MIL-STD-461G. Составлены подробные таблицы распространения норм испытаний на различные виды жгутов и отдельных проводников для самолетов различной конструкции методом «кабельной инъекции» двумя циклограммами испытательных воздействий: «многократные удары» и «многократные вспышки». Подробно рассмотрены возможности применения существующих в НИПКИ «Молния» генераторов на молниестойкость типа ИГЛА, а также методику их доработки под нормы стандарта MIL-STD-461G.

**Ключевые слова:** испытания, молниестойкость, бортовое авиационное оборудование, многократные удары, многократная вспышка, нормы испытаний.