# Исследования наночастиц карбида вольфрама, полученных плазмохимическим методом

**Х.Б. Ашуров[1], В.Н. Арустамов[1], И.Х. Худайкулов[1], Ж.Р. Равшанов[1,2], Д.Т. Усманов[*,1]**

[1]Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, ул. Дурмон йули 33, 100125 Ташкент, Узбекистан
[2]Навоийский государственный горный институт, ул. Таробий 72, 210100, Навои, Узбекистан

Получена 15.10.2021

* Corresponding author: e-mail: usmanov@iplt.uz, Phone: +998 71 262 32 54

Разработана экспериментальная установка для плазмохимического синтеза нанопорошков карбида вольфрама, которая позволяет получать их непосредственно из оксида вольфрама, для создания наноструктурных твердых сплавов. Синтез нанопорошков карбида вольфрама осуществлен в плазме электродугового разряда низкого вакуума. Изучены возможности использования различных связующих для изготовления брикетов (таблеток) из порошков оксида вольфрама. Полученные нанопорошки карбида вольфрама были проанализированы рентгенофазовым анализом (порошковый дифрактометр), рамановской спектроскопией и микроскопией. Выяснено, что при синтезе нанопорошков карбида вольфрама формируются различные фазы, такие как WC, $W_2C$ и $WC_{1-x}$, которые объясняются параметрами электродугового разряда и распределением прекурсоров.

**Ключевые слова:** плазмохимический синтез, карбид вольфрама, нанопорошки, вакуумный электродуговой разряд, рентгенофазовый анализ.

An experimental setup for the plasma-chemical synthesis of tungsten carbide nanopowders has been developed, which allows the nanopowder to be obtained directly from tungsten oxide to create nanostructured hard alloys. The synthesis of tungsten carbide nanopowders was carried out in the plasma of an electric arc discharge of a low vacuum. The possibilities of using various binders for the manufacture of briquettes (tablets) from tungsten oxide powders have been studied. The resulting tungsten carbide nanopowders were analyzed by X-ray phase analysis (powder diffractometer), Raman spectroscopy, and microscopy. It was found that during the synthesis of tungsten carbide nanopowders the various phases such as WC, $W_2C$ and $WC_{1-x}$ are formed, which are explained by the parameters of the electric arc discharge and the distribution of precursors.

**Keywords:** plasma-chemical synthesis, tungsten carbide, nanopowders, vacuum electric arc discharge, X-ray phase analysis.

DOI: PACS number(s): 00.00.Xx, 00.00.Xx Copyright line will be provided by the publisher

## I. Введение

Одной из востребованных задач в технике является получение недорогих материалов и сплавов, которые имеют подходящие физико-химические и механические свойства. Карбид вольфрама WC является одним из них, и активно применяется в технике для изготовления инструментов, требующих высокой твёрдости и коррозионной стойкости. Характеристики твердых сплавов и композиционных материалов на основе карбидов зависят от размеров частиц карбидной фазы. Уменьшение размера нанопорошков (НП) приво-

дит к существенному улучшению физико-механических свойств материалов [1]. В настоящее время для синтеза НП карбида вольфрама применяются разные физические и химические методы [2-9], но каждый из них имеет свои недостатки и преимущества. Большинство предлагаемых методов синтеза предусматривает получение НП вольфрама с последующей карбидизацией наночастиц металлического вольфрама [10]. Этот путь заведомо приводит к удорожанию получаемого продукта, требуя дополнительно огромных материальных и энергетических затрат.

Таким образом, вопросы, связанные, с одной стороны, с повышением производительности способа синтеза и уменьшением себестоимости НП, с другой стороны, с увеличением селективности получаемого материала по фазовому составу, требуют своего решения. Одним из обнадеживающих методов получения НП карбида вольфрама является синтез в плазме электродугового разряда низкого давления [11].

В работе [12] сообщается о применимости метода вакуумного электродугового разряда для синтеза карбидов металлов ZrC, TiC, WC при распылении в ацетилене, разбавленном аргоном или водородом. Найдено, что наиболее эффективным углеводородным реагентом является ацетилен, так как он имеет чрезвычайно высокую запасенную химическую энергию (226.8 кДж/моль), зависящую от формирования тройной связи, за счет участия которой в образовании карбидов в реакции ацетилена и металла усиливается экзотермический эффект. К настоящему времени синтез НП карбидов не только осуществляется вакуумным дуговым методом, а также появилось несколько работ, в которых синтез был проведен в атмосфере с использованием той же техники [13].

Целью настоящей работы является получение нанопорошков карбида вольфрама в процессе плазмохимического восстановительного синтеза непосредственно из оксида вольфрама в плазме электродугового разряда низкого вакуума с использованием различных связующих и исследование их физико-химических параметров.

## II. Экспериментальная часть

Синтез нанопорошков WC осуществлен с использованием специально разработанной экспериментальной установки низкотемпературной плазмы вакуумного электродугового разряда. Для реализации процесса синтеза НП карбида вольфрама вакуумно-дуговым методом разработана электродная система коаксиального типа. Упрощенная схема камеры вакуумного дугового разряда представлена на рис. 1. В этой системе зажигание электрической дуги, имеющей ток разряда, равный 80–200 А, и напряжение разряда, равное 20–30 В, производится между графитовым электродом (катод) и композитным (анод) электродом.

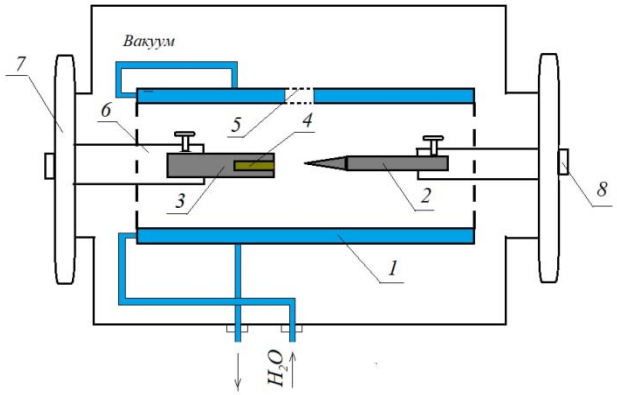



**Рисунок 1.** Электродная система отработки процесса получения нанопорошков вакумно-дуговым методом: 1 – охлаждаемый экран, 2 – графитовый электрод-анод, 3 – графитовый электрод-катод, 4 – образец, 5 – технологическое отверстие для инициирования вакуумной дуги, 6 – держатель, 7 – фланец, 8 –ввод.

Композитный электрод представляет собой графитовый стержень с просверленной полостью по центру, наполненной кислород-содержащим соединением вольфрама, выбранным из группы, содержащей $WO_3$, $W(CO)_6$, причем массовое содержание графита и соединений вольфрама выбирают в соотношении, равном от 1:0.5 до 1:2. Поддержание условий горения дуги осуществляется варьированием межэлектродного распыления композитного электрода в электрической дуге. Образованные частицы в процессе такого взаимодействия осаждаются на охлаждаемую внутреннею поверхность специального цилиндрического электрода *1*, в котором коаксиально размещена электродная система, состоящая из анода и составного катода *2*, *3*. Относительное давление поддерживалось в камере в пределах $1\times10^{-3}$ Торр.

Одной из важных задач синтезирования НП в предложенном методе является брикетирование прекурсоров.

Чтобы синтезировать НП карбида вольфрама сначала была разработана методика изготовления

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

таблетки (брикетов), состоящей из порошков оксида вольфрама и связующих материалов, таких как технический углерод (сажа), щавелевая кислота и глюкоза. Для изготовления таблеток из порошка оксида вольфрама и связующих материалов сконструирована пресс-форма, которая состоит из двух частей: пуансон и матрица. На рис. 2 представлены таблетки оксида вольфрама, созданные методом прессования без связующего элемента и со связующим элементом. В качестве связующего материала использованы порошок технического углерода (в соотношении 3:1) и глюкоза ($WO_3$ 90%, C 5% и глюкоза 5%). Полученные таблетки были помещены внутрь графитового электрода.

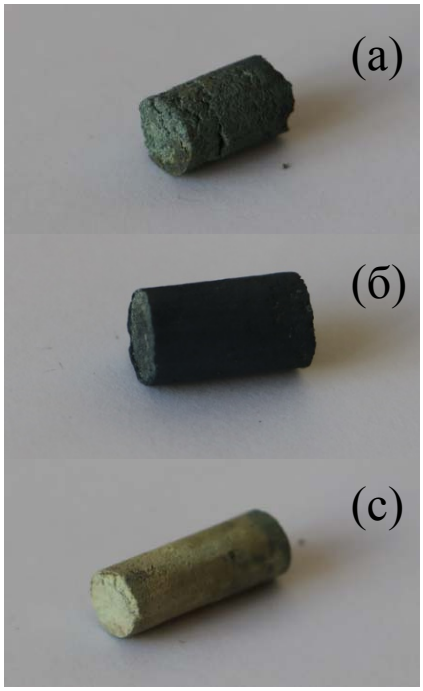



**Рисунок 2.** Образцы, полученные прессованием порошка оксида вольфрама со связующим материалом: *а* – без связующего элемента, *б* – таблетка со связующим порошком технического углерода (в соотношении 3:1), *с* – таблетка, в которой в качестве связующего материала использована глюкоза ($WO_3$ 90%, C 5% и глюкоза 5%).

Синтез НП карбида вольфрама в плазме электродугового разряда проведен испарением таблетки. Все синетзированные нанопорошки были обмыты перед анализом. Рентгенофазовый анализ синтезированных нанопорошков проведен порошковым рентгеновским дифрактометром XRD-6100 (Shimadzu, Japan). Для получения рентгеновских спектров использовано CuKα-излучение λ=1.540600 Å с постоянной скоростью вращения детектора 4 град/мин с шагом 0.05 град в интервале углов 2θ, угол сканирования менялся от 10° до 80°. Спектр комбинационного рассеяния света нанопорошков WC получен с помощью InVia$^{TM}$ Raman спектрометра (Renishaw, Great Britain) с применением источника возбуждения Cobolt CW 532 nm DPSS лазера с длиной волны излучения λ=532 нм.

## III. Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведена рентгенограмма нанопорошков карбида вольфрама, полученная в низкотемпературной плазме вакуумного электродугового разряда.

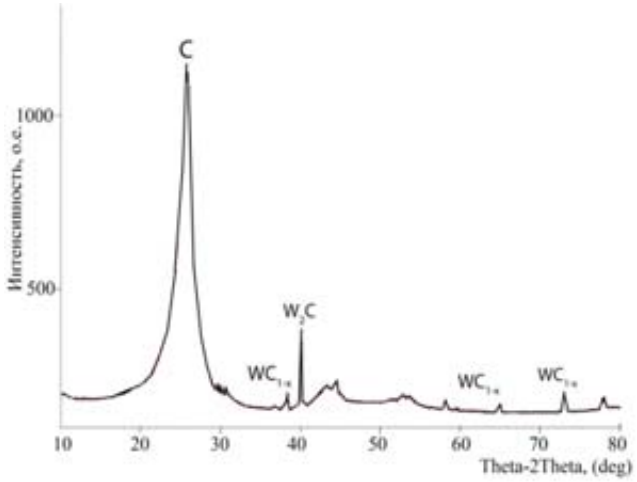



**Рисунок 3.** Рентгенограмма образца порошков WC со связующим материалом глюкоза.

Спектр нанопорошков был получен при углах θ–2θ (full profile analysis). Нанопорошки WC получены с использованием таблетки, в которой связующим была глюкоза. Полученные нанопорошки сначала очищали (мыли), затем подвергали рентгенофазовому анализу. Как известно, интенсивность рефлексов каждой фазы зависит от ее количества в исследуемой смеси и степени кристаллизации. Из рентгенограммы видно, что исследуемый объект состоит из нескольких фаз, каждой фазе соответствует своя собственная дифракционная картина. Интенсивности рефлексов каждой фазы зависят от ее количества в исследуемой смеси и степени кристаллизации. Пики на рентгенограмме, показанные на рис. 3, указывают на присутствие фазы C, полукарбида вольфрама $W_2C$ и кубического карбида вольфрама $WC_{1-x}$.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

Уширение пика С означает, что в этих композитах С имеет очень маленький размер частиц. Пиков монокарбида вольфрама WC не наблюдалось в рентгенограмме. В работе [14] получены наноразмерные порошки карбида вольфрама с использованием плазмохимического метода. В качестве источника углерода использованы углеводороды.

Для синтеза нанопорошков карбида вольфрама авторы использовали различные прекурсоры, такие как $WC_{l6}$, $WF_6$, $W(CO)_6$, $(5(NH_4)_2O_{12}WO_35H_2O)$ и $CoWO_4$. Полученными конечными продуктами являются $WC_{1-x}$ и $W_2C$, но последующая термообработка полученных нанопорошков с применением водорода выводит фазу $WC_{1-x}$ полностью науглероженной до WC. Отсюда следует, что если нужно было получить нанопорошки монокарбида вольфрама, необходимо провести последующую термобработку. Однако, в зависимости от реализованного температурного поля градиентов скорости изменения температуры и отношения начальных прекурсоров, в результате электродугового процесса получают продукты, содержащие различные кристаллические фазы карбида вольфрама: монокарбид вольфрама WC (гексагональный), полукарбид вольфрама $W_2C$ (ромбический и гексагональный), $WC_{1-x}$ (кубический) [15]. Более того, в конечном продукте часто встречаются одновременно несколько фаз карбида вольфрама из-за высокого температурного градиента в зоне реакции и неравномерного распределения исходных прекурсоров в объеме зоны реакции. Как правило, частицы характеризуются широким распределением размеров от нанометров до микрометров и часто встроенные в углеродную матрицу или в углеродные оболочки. Это связано с избытком углерода как в материале электродов, так и в исходном предшественнике. Исходя из этого, можно сказать, что при синтезе НП карбида вольфрама был высокий градиент температуры, и это сказывалось на формировании наночастиц карбида вольфрама. Анализ рентгенограмм показывает, что аморфизация порошка составляет 13.3%, а кристалличность – 86.7%.

На рис. 4 представлена рентгенограмма НП карбида вольфрама, полученная от таблетки с щавелевой кислотой. Спектр образца получен при угле 2θ (phase analysis). Из рисунка видно, что исследуемый нанопорошок состоит из нескольких фаз, каждой фазе соответствует своя собственная дифракционная картина, также интенсивность рефлексов каждой фазы зависит от ее количества в исследуемой смеси и степени кристаллизации. При углах 2θ в 31.45°, 35.65°, 48.4°, 64.1°, 73.3° 66.1°, 75.9° и 76.95° наблюдались дифракционные рефлексы, соответствующие наночастицам монокарбида вольфрама WC. А при углах 2θ 34.5°, 38.2°, 39.6° и 52.3° наблюдались дифракционные рефлексы, соответствующие наночастицам полукарбида вольфрама $W_2C$. Интенсивный рефлекс при угле 26.6° соответствовал графиту [16], также несколько относительно неинтенсивных рефлексов С наблюдались на рентгенограмме. Интенсивные рефлексы на рентгенограмме при углах 23.59°, 24.39°, 34.19° и 40.34° соответствовали $WO_3$ [17]. Кристаллические решетки наночастиц WC и $W_2C$ являются соответственно гексагональной и тригональной с гексагональными осями, что вполне соответствует литературным данным. Параметры решетки составляют $a$=2.8979 Å, $c$= 2.8289 Å для WC, $a$=5.1900 Å, $c$=4.7240 Å для $W_2C$.

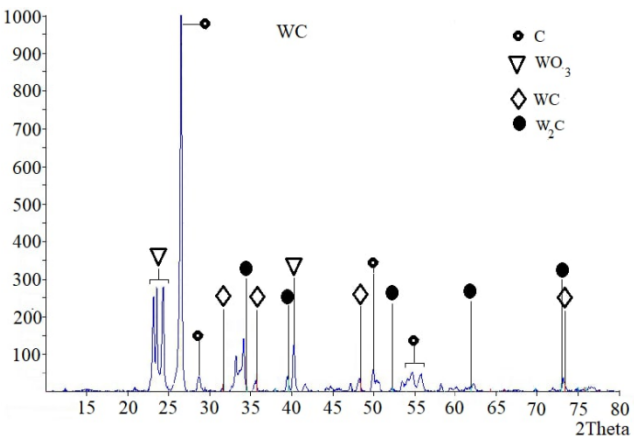



**Рисунок 4.** Рентгенограмма образца порошка WC со связующим материалом из щавелевой кислоты.

Степень кристалличности исследованного нанопорошка составляет 86.58%. Аморфное содержание (мас.%) образца составило 13.42%. Присутствие в рентгенограмме нескольких фаз $W_2C$, С и $WO_3$ показывает наличие высокого температурного градиента в зоне реакции, а также неравномерное распределение исходных прекурсоров в объеме зоны реакции.

На рис. 5 представлена рентгенограмма НП карбида вольфрама, полученная от таблетки с техническим углеродом. Из рентгенограммы видно, что исследуемый образец тоже состоит из нескольких фаз. Наблюдаемые дифракционные рефлексы тоже соответствуют монокарбиду

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

вольфрама WC, полукарбиду вольфрама $W_2C$, графиту и оксиду вольфрама $WO_3$. Однако, выход монокарбида вольфрама WC и полукарбида вольфрама $W_2C$ увеличивается в несколько раз, когда связующим материалом является технический углерод, а не щавелевая кислота. На этом образце методом Ритвельда [18] определены межплоскостное растояние $d_{hkl}$ и соответствующие индексы Миллера (*hkl*). Выяснено, что с увеличением индекса Миллера межплоскостное расстояние *d* уменьшается от 2.82931 Å до 1.2320 Å для WC. Кристалличность порошка составила 100%.

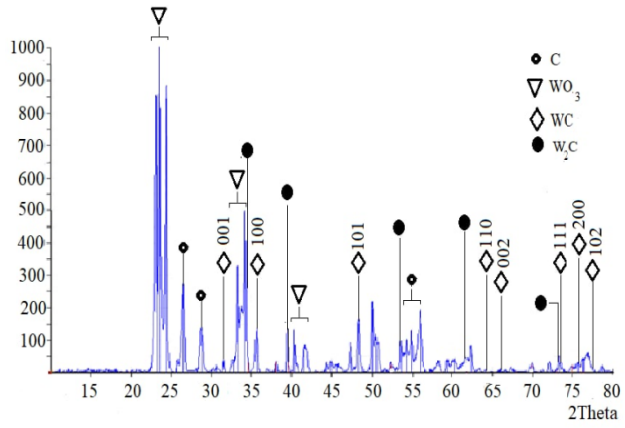



**Рисунок 5.** Рентгенограмма образца порошка WC со связующим материалом из технического углерода (сажи).

Для выяснения структурных особенностей синтезированного порошка был применен метод спектроскопии КРС. На рис. 6 представлен КРС-спектр, снятый для продукта одного синтеза, в котором использован технический углерод как связующий материал. Из рис. 6 видно, что в спектре при частоте 797 $см^{-1}$ наблюдалась широкая полоса, вызванная колебаниями растяжения связей в оксиде вольфрама $WO_3$. Помимо этого пика, зарегистрированы полосы *D* (1338 $см^{-1}$) и *G* (1562 $см^{-1}$), обусловленные разупорядоченным $sp^2$-углеродом. Эти данные хорошо согласуются с литературными данными, незначительные смещения пиков можно объяснить размерами НП [19]. В спектре образца не проявляется Раман-сигнал чистого карбида вольфрама, что вполне соответствует литературным данным [20], так как чистый карбид вольфрама не проявляет Раман-сигнала из-за жесткой структуры кристаллической решетки.

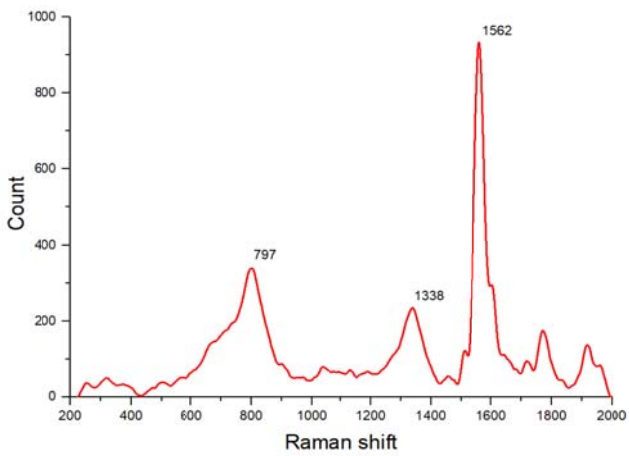



**Рисунок 6.** Спектр комбинационного рассеяния нанопорошка карбида вольфрама, полученный от таблетки с техническим углеродом.

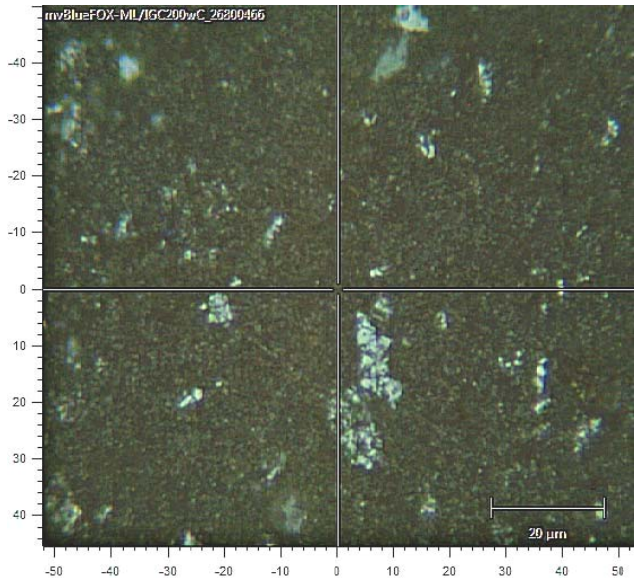



**Рисунок 7.** Микрофотография образца порошка WC со связующим материалом из технического углерода.

На рис. 7 представлена микрофотография образца порошка WC со связующим материалом из технического углерода, полученная микроскопом, соединенным с Раман спектрометром. Микрофотография получена с использованием лазера 532 нм. Из снимка видно, что полученный НП состоит в основном из мелких наноразмерных частиц, но также наблюдаются и крупные агломерации, который образовались после синтеза. Тем не менее, уширенные линии, полученные в рентенограммах свидетельствуют, что образованные частицы имеют малые размеры частиц.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

## IV. Заключение

Таким образом, разработана экспериментальная установка, позволяющая осуществлять синтез нанопорошков карбида вольфрама путем плазмохимического восстановительного синтеза непосредственно из оксида вольфрама для создания наноструктурных твердых сплавов. Плазмохимический синтез осуществлен в плазме электродугового разряда низкого вакуума. Уширенные рефлексные линии и микрофотографии образцов указывают на наноразмерные характеристики синтезированных образцов. Рентгенофазовые анализы показывают, что при синтезе образовалось несколько фаз карбида вольфрама, таких как WC, $W_2C$ и $WC_{1-x}$ соответственно с гексагональной, тригональной с гексагональными осями и кубической кристаллическими решетками. Формирование фаз $W_2C$ и $WC_{1-x}$ при синтезе объясняется высоким температурным градиентом и неравномерным распределением исходных прекурсоров в объеме зоны реакции в процессе электродугового разряда низкого вакуума. Полученные эксперименталь-ные результаты и их интерпретация демонстрируют перспективность метода синтеза для нанопорошков карбида вольфрама. Продолжаются научные работы в этом направлении в лаборатории.

**Благодарности.** Авторы благодарны к.ф.-м.н. В.М. Ротштейну за помощь в получении КРС спектров образца.

**Финансирование работы**. Работа выполнена в рамках проекта № ФЗ-201907092 Министерства Инновационного развития Республики Узбекистан.

### Метаданные

## Study of tungsten carbide nanoparticles obtained by the plasma-chemical method

**Kh.B. Asurov[1], V.N. Arustamov[1], I.Kh. Khudaykulov[1], R.J. Ravshanov[1,2], D.T. Usmanov[1]**

[1]Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Uzbekistan Academy of Sciences, Durmon Yoli street 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan
[2]Navoi State Mountain Institute, Tarobiy street 72, 210100, Navoi, Uzbekistan

An experimental setup for the plasma-chemical synthesis of tungsten carbide nanopowders has been developed, which allows the nanopowder to be obtained directly from tungsten oxide to create nanostructured hard alloys. The synthesis of tungsten carbide nanopowders was carried out in the plasma of an electric arc discharge of a low vacuum. The possibilities of using various binders for the manufacture of briquettes (tablets) from tungsten oxide powders have been studied. The resulting tungsten carbide nanopowders were analyzed by X-ray phase analysis (powder diffractometer), Raman spectroscopy, and microscopy. It was found that during the synthesis of tungsten carbide nanopowders the various phases such as WC, $W_2C$ and $WC_{1-x}$ are formed, which are explained by the parameters of the electric arc discharge and the distribution of precursors.

**Keywords:** plasma-chemical synthesis, tungsten carbide, nanopowders, vacuum electric arc discharge, X-ray phase analysis.

### Литература (References)

[1] N.P. Lyakishev, M.I. Alimov. Nanomaterialy konstruktsionnogo naznacheniya., Rossiyskie nanotekhologii **12**, 71-81 **(**2006).

[2] V.V. Dushik, N.V. Rozhanskii, V.O. Lifshits, T.V. Rybkina, V.P. Kuzmin. The formation of tungsten and tungsten carbides by CVD synthesis and the proposed mechanism of chemical transformations and crystallization processes. Mater. Lett. **228**, 164-167 (2018). https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.06.003.

[3] H. Zhang, X. Yu, Zh. Nie, Ch. Tan, F. Wang, H. Cai, Y. Li, F. Wang, H. Cai. Microstructure and growth mechanism of tungsten carbide coatings by atmospheric CVD. Surf. Coat. Technol. **344**, 85-92 (2018). https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.03.011.

[4] F. Zhu, Zh. Chen, K. Liu, W. Liang, Zh. Zhang. Deposition of thin tungsten carbide films by dual ion beam sputtering deposition. Vacuum **157**, 45-50 (2018). https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.08.023.

[5] Z. Fenggang. Tungsten carbide phase transformation under non-equilibrium solidification of high intensity pulsed ion and electron beams. Vacuum **159**, 254-260 (2019). https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.10.045.

[6] G.E. Remnev, V.V. Uglov, V.I. Shymanski, S.K. Pavlov, A.K. Kuleshov. Formation of nanoscale carbon structures in the surface layer of metals under the impact of high intensity ion beam. Appl. Surf. Sci. **310,** 204-209 (2014). https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.04.068.

[7] Kh.G Kirakosyan, Kh.V Manukyan, S.L. Kharatyan, R.A. Mnatsakanyan. Synthesis of tungsten carbide-carbon nanomaterials by combustion reaction. Mater. Chem. Phys. **110**, 454-456 (2008), https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.03.003.

[8] Sh. Tanaka, I. Bataev, H. Oda, K. Hokamoto. Synthesis of metastable cubic tungsten carbides by electrical explosion of tungsten wire in liquid paraffin. Adv. Powder Technol. **29**, 2447-2455 (2018). https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.06.025.

[9] A. Pak, A. Sivkov, I. Shanenkov, I. Rahmatullin, K. Shatrova. Synthesis of ultrafine cubic tungsten carbide in a dis-

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.

charge plasma jet. Int. J. Refract. Met. Hard Mater. **48**, 51-55, (2015), https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm. 2014.07.025.
[10] N.V. Isaeva, Yu.V. Blagoveshenskiy, N.V. Blagoveshenskaya, Yu.I. Melnik, A.V. Samoxin, N.V. Alekseev, A.G. Astashov. Poluchenie nanoporoshkov karbidov i tverdosplavnix smesey s primeneniem nizkotemperaturnoy plazmy. PM i PF Izvestiya Vuzov **3**, 7-14 (2013).
[11] S.Q. Zhao, S.W. Jin, Y.X. Wang. The preparation of ultrafine tungsten carbide nanoparticles by DC arc discharge plasma process. Mod. Phys. Lett. B **27**, 1341003 (2013). https://doi.org/10.1142/S0217984913410030.
[12] A.A. Lepeshev, A.V. Ushakov, I.V. Karpov. Plazmokhimicheskiy sintez poroshkov i polimernikh nanokompozitov (Sib. Feder. Un-t, Krasnoyarsk, 2012), 328 c.
[13] A.Ya. Pak, I.I. Shanenkov, G.Y. Mamontov, A.I. Kokorina. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials **93**, 105343 (2020).
[14] A.V. Samokhin, N.V. Alekseev, S.A. Kornev, M.A. Sinaiskii, Yu.V. Blagoveschenskiy, A.V. Kolesnikov. Tungsten carbide and vanadium carbide nanopowders synthesis in DC plasma reactor. Plasma Chem. Plasma Process **33**, 605-616 (2013). DOI 10.1007/s11090-013-9445-9
[15] Y. Saito, T. Matsumoto, K. Nishikubo. Encapsulation of carbides of chromium, molybdenum and tungsten in carbon nanocapsules by arc discharge. J. Cryst. Growth **172**, 163-170 (1997). https://doi.org/10.1016/S0022-0248(96)00709-9
[16] R.N. Kyutt, A.M. Danishevskiy, E.A. Smorgonskaya, S.K. Gordeyev. Rentgenodifraksionnoe issledovanie struktury nanoporistogo ugleroda, poluchennogo iz karbidnikh materialov. Fizika i Tekhnika Poluprovdnikov **37**, 811-815 (2003).
[17] V.S. Shadrin, T.A. Popova, Ye.S. Dedova. Sovremennie tekhnika i texnologii. Sektsiya 12: Nanomateriali, nanotexnologii i novaya energetika, s. 465.
[18] H.M. Rietveld. The Rietveld method: a retrospection. Z. Cristallogr. **225**, 545-547 (2010). doi:10.1524/zkri.2010.1356.
[19] I.A. Novosyolova, Ye.P. Nakoneshnaya, N.A. Karpushin, V.N. Bikov, G.I. Dovbeshko, A.D. Rinder., Metallofiz. Noveyshie Texnol. **36**, 491-508 (2014).
[20] A. Kromka, J. Janik, A. Satka, J. Pavlov. Investigation of carburisation of tungsten-carbide formation by hot-filament CVD technique. Acta Physica Slovaca **51**, 359-368 (2001).

## Плазма-кимёвий усулида олинган вольфрам карбид нанозарраларини тадқиқ қилиш

**Х.Б. Ашуров[1], В.Н. Арустамов[1], И.Х. Худайкулов[1], Ж.Р. Равшанов[1,2], Д.Т. Усманов[1]**

[1]ЎзР ФА Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Дўрмон йўли кўчаси 33, 100125, Тошкент, Ўзбекистон
[2]Навои давлат кончилик институти, Таробий кўчаси 72, 210100, Навоий, Ўзбекистон

Вольфрам карбидининг наноструктурали қаттиқ қотишмаларни яратиш учун уларнинг нанокукунларини тўғридан-тўғри волфрам оксидидан олиш имконини берувчи плазма-кимёвий синтези учун экспериментал қурилма ишлаб чиқилди. Вольфрам карбидининг нанокукунлари синтези паст вакуумли электр ёйи зарядининг плазмасида амалга оширилди. Вольфрам оксиди кукунларидан брикетлар (таблетка) тайёрлаш учун турли боғловчилардан фойдаланиш имкониятлари ўрганилди. Олинган вольфрам карбид нанокукунлари рентген фазали таҳлил (чанг дифрактометри), Раман спектроскопияси ва микро-скопия ёрдамида таҳлил қилинди. Аниқланишича, вольфрам карбидли нанокукунларни синтез қилиш жараёнида WC, $W_2C$ ва $WC_{1-x}$ каби турли фазалар ҳосил бўлишини электр ёйи разряди ва прекурсорларнинг тақсимланиш параметрлари билан изоҳланади.

**Калит сўзлар:** плазма кимёвий синтез, вольфрам карбиди, нанокукунлар, вакуумли электр ёйи разряди, рентген фазали таҳлил.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2021 г.