

ЛИТЕРАТУРА

1. Алымов М. И. Порошковая металлургия нанокристаллических материалов. М.: Наука, 2007.
2. Сергеев Г. Б. Нанохимия: Учеб. пос. М.: КДУ, 2006.
3. Старостин В. В. Материалы и методы нанотехнологии: Учеб. пос. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.
4. Рыжонков Д. И., Лёвина В. В., Дзидзигури Э. Л. Наноматериалы: Учеб. пос. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 20010.
5. ГОСТ 19433-88. Грузы опасные. Классификация и маркировка.

УДК 669.018.9 : 533.9

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОПОРОШКОВ КАРБИДОВ И ТВЕРДОСПЛАВНЫХ СМЕСЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

© 2013 г. **Н. В. Исаева, Ю. В. Благовещенский, Н. В. Благовещенская, Ю. И. Мельник, А. В. Самохин, Н. В. Алексеев, А. Г. Асташов**

Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова (ИМЕТ) РАН, г. Москва

Н. В. Исаева – мл. науч. сотр. лаборатории № 16 ИМЕТ РАН (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 49)
Тел.: (499) 135-94-71. Факс: (499) 135-43-64. E-mail: felix-2001@mail.ru.

Ю. В. Благовещенский – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. лаборатории № 5 ИМЕТ РАН. Тел.: (499) 135-77-53. E-mail: yuriblag@imet.ac.ru.

Н. В. Благовещенская – науч. сотр. той же лаборатории. Тел.: (499) 135-94-71. E-mail: yuriblag@imet.ac.ru.

Ю. И. Мельник – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. той же лаборатории. Тел.: 8(499)135-94-71. E-mail: mel.yuri.nik@gmail.com.

А. В. Самохин – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории № 16 ИМЕТ РАН. Тел.: (499) 135-43-64. E-mail: samokhin@imet.ac.ru.

Н. В. Алексеев – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. той же лаборатории. Тел.: (499) 135-43-64. E-mail: nvalexeev@yandex.ru.

А. Г. Асташов – аспирант той же лаборатории. Тел.: (499) 135-77-63. E-mail: alexey.astashov@gmail.com.

Исследованы процессы получения наноразмерных порошков карбидов вольфрама, а также других карбидов переходных металлов с использованием плазмохимического восстановительного синтеза. Выявлены основные закономерности получения порошков заданных дисперсности и состава. Характерные размеры частиц карбидов составляли 40–80 нм. С целью получения гомогенной смеси нанопорошков WC–Co с точным массовым содержанием разработана методика осаждения кобальта на порошок карбида вольфрама с одновременным введением добавок карбидов-ингибиторов, таких как карбиды хрома, ванадия и тантала. Полученные нанопорошки исследовались с применением современных методов, в том числе растровой электронной микроскопии высокого разрешения, фракционного газового анализа.

Ключевые слова: плазмохимический восстановительный синтез, нанопорошки, карбид вольфрама, карбиды-ингибиторы, кобальт, твердый сплав.

The processes to produce nanosized tungsten carbide powders as well as other transition metal carbides have been investigated with the use of plasma-chemical reduction synthesis. The basic regularities of producing powders of specified dispersion and composition have been determined. Characteristic particle sizes of carbides are 40–80 nm. For the purpose of homogeneous WC–Co nanopowders mixture production with exact mass content, a technique of cobalt sedimentation onto tungsten carbide powder with simultaneous adding of retardant-carbides such as chromium, vanadium, and tantalum carbides has been developed. The produced nanopowders have been examined with modern methods including high-resolution SEM and fractional gas analysis.

Key words: plasma-chemical reduction synthesis, nanopowders, tungsten carbide, retardant-carbides, cobalt, hard metal.

ВВЕДЕНИЕ

Большое количество исследований посвящено процессам формирования особомелкозернистых карбидовольфрамовых твердых сплавов, которые должны иметь существенно более высокие эксплуатационные свойства. Субмикрометровые (0,8 мкм), ультрадисперсные (0,4 мкм) и еще более мелкие (0,2 мкм) порошки карбида вольфрама (WC) уже используются для этих целей и выпускаются промышленностью за рубежом. Однако значительное повышение

физико-механических свойств материалов возможно только при использовании порошков нанометрового размера. Научные основы их получения разработаны давно [1–5], однако к настоящему времени еще не существует промышленного высокопроизводительного процесса получения нанопорошков карбида вольфрама. В нашей стране разработана плазмохимическая технология, позволяющая получать широкий спектр нанопорошков металлов и тугоплавких соединений на аппаратах различной производительности вплоть до десятков кг/ч [6].

Целью настоящей работы является исследование процессов получения путем плазмохимического восстановительного синтеза нанопорошков карбида вольфрама, ряда других карбидов переходных металлов, а также композиций WC-Co с добавками карбидов-ингибиторов для развития сырьевой базы с целью создания наноструктурных твердых сплавов.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ

В работе исследованы процессы получения нанопорошков карбидов и смесей из оксидного и другого сырья для спекания карбидовольфрамовых твердых сплавов.

Синтез нанопорошков систем Me-C в потоке термической плазмы электродугового плазмотрона проведен с использованием реактора с ограниченным струйным течением. Плазменная струя генерируется в электроразрядном генераторе термической плазмы номинальной мощностью 25 кВт.

В струе термической плазмы происходят испарение и химическое превращение исходного сырья с последующим формированием наночастиц. Истечение плазменного потока в объем реактора с водоохлаждаемой поверхностью обеспечивает быстрое охлаждение струи, достижение температуры конденсации и формирования наноразмерных частиц из газовой фазы. Разработанная конструкция плазменного реактора синтеза нанопорошков защищена патентом РФ [7]. Общий вид и схема экспериментальной установки представлены на рис. 1. На ней же исследовался синтез порошков систем V-C и Cr-C из оксидов и металлов, а также TaC из соответствующего хлорида.

Синтез нанопорошков карбида вольфрама из плазмохимических порошков системы W-C проводился на проточной установке, состоящей из печи сопротивления фирмы «Naberterm», системы подачи газа с регулированием расхода газа от 0,6 до 90 л/ч и кварцевого реактора, в котором протекали восстановление и собственно синтез. Для получения наноразмерной композиции WC-Co с

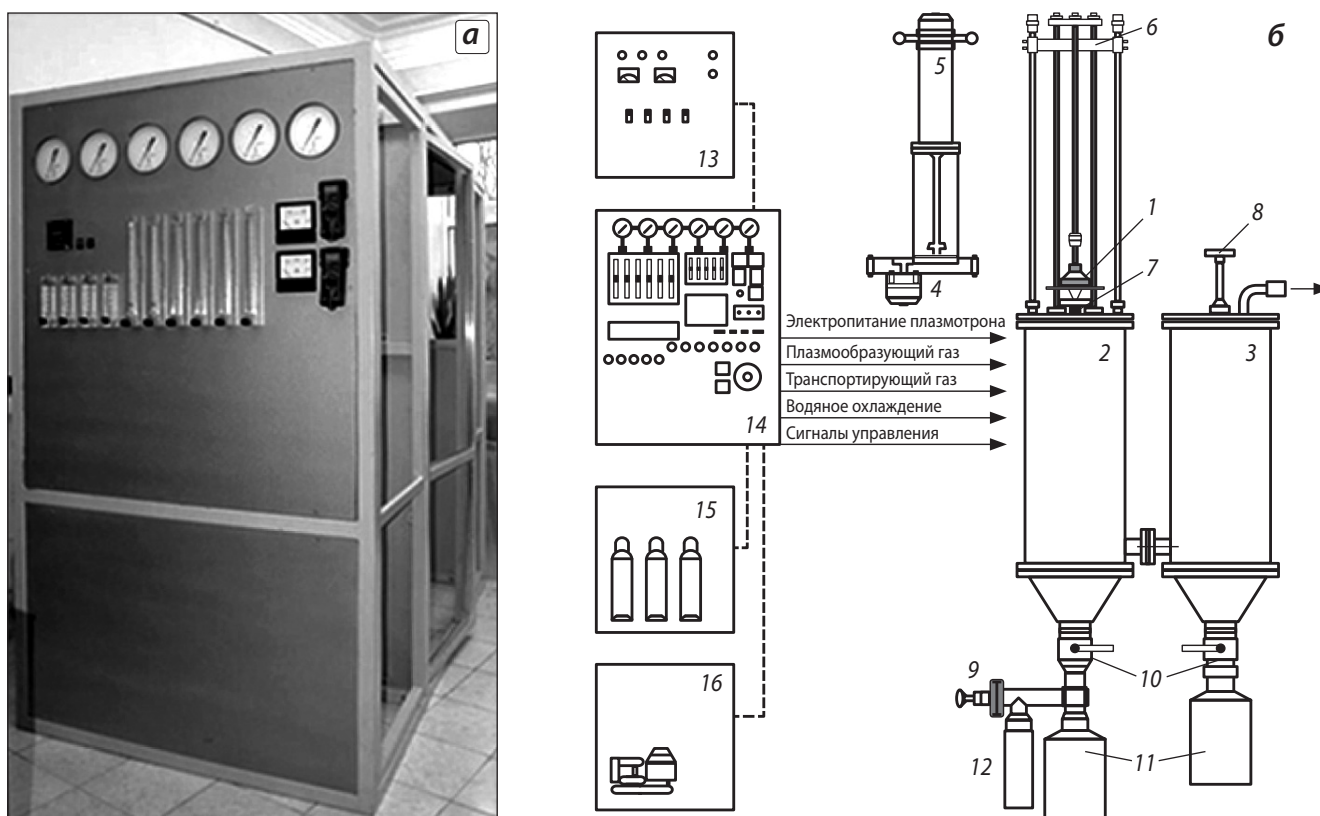


Рис. 1. Общий вид (а) и схема (б) плазмохимической установки для синтеза нанопорошков

1 – электродуговой плазмотрон с камерой смешения; 2 – плазмохимический реактор; 3 – рукавный фильтр; 4, 5 – дозатор дисперсного сырья; 6–10 – система удаления продукта из реактора; 11, 12 – контейнеры для продукта; 13 – источник питания плазмотрона; 14 – стенд КИП; 15, 16 – системы газо- и водообеспечения

введенными в нее добавками карбидов-ингибиторов была использована методика осаждения соли кобальта из раствора с последующим ее восстановлением в водороде на той же установке.

Физико-химические исследования полученных нанопорошков включали:

- рентгенофазовый анализ (РФА), проведенный на дифрактометре RIGAKU Ultima-4 в отфильтрованном CuK_α -излучении с высокоскоростным детектором D/teX, программным пакетом PDXL и банком данных PDF-2;

- измерение удельной поверхности порошков на анализаторе Micromeritics TriStar 3000;

- сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) на микроскопе JSM-6700F;

- определение содержания общего углерода на анализаторе LECO CS-400;

- химический анализ на содержание металлов (кобальт, ванадий, хром, тантал) на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Ultima-2 фирмы «Jobin Yvon Horiba».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования определены влияние соотношения элементов C/W в исходных реагентах при различном расходе WO_3 , а также энтальпии плазменной струи на химический, фазовый и дисперсный составы получаемых продуктов.

По данным РФА выявлено, что нанопорошки системы W–C (рис. 2, а) состоят из смеси W_2C , $\beta\text{-WC}$ (WC_{1-x}), W, WC, C с преобладанием фаз

W, W_2C , $\beta\text{-WC}$ при содержании общего углерода 5–8 мас.%. Удельная поверхность полученных образцов изменялась в диапазоне $S_{\text{уд}} = 15 \div 50 \text{ м}^2/\text{г}$.

Нанопорошки состоят преимущественно из частиц W размером менее 30 нм (см. рис. 2, б), причем на их поверхности отмечено наличие слоя углерода [8].

Установлено, что основным параметром, определяющим содержание углерода в получаемых в плазме порошках, является соотношение элементов C/W в исходных реагентах. Удельная поверхность определяется преимущественно энтальпией плазменной струи и опять же соотношением C/W. Увеличение энтальпии приводит к уменьшению $S_{\text{уд}}$ нанопорошка при возрастании доли карбидных фаз в получаемом продукте.

Величина удельной поверхности образцов коррелирует с содержанием общего углерода – чем оно больше, тем выше величина $S_{\text{уд}}$. Это обусловлено ростом концентрации свободного углерода, имеющего высокую удельную поверхность, однако нельзя не учитывать и возможность изменения дисперсного состава нанопорошка из-за изменения скорости зародышеобразования и конденсационного роста частиц в присутствии углерода.

Сохранение наноструктуры при спекании нанопорошков WC–Co невозможно без введения карбидов-ингибиторов, способствующих подавлению роста зерна карбида вольфрама. В качестве таковых в работе использовались карбиды ванадия, хрома и тантала.

Экспериментальные исследования синтеза нанопорошка карбида ванадия проводились при

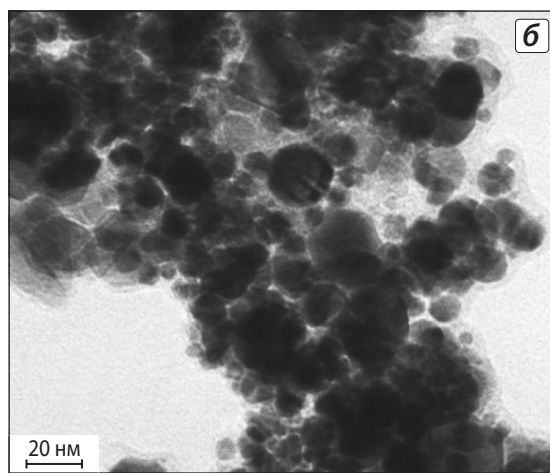
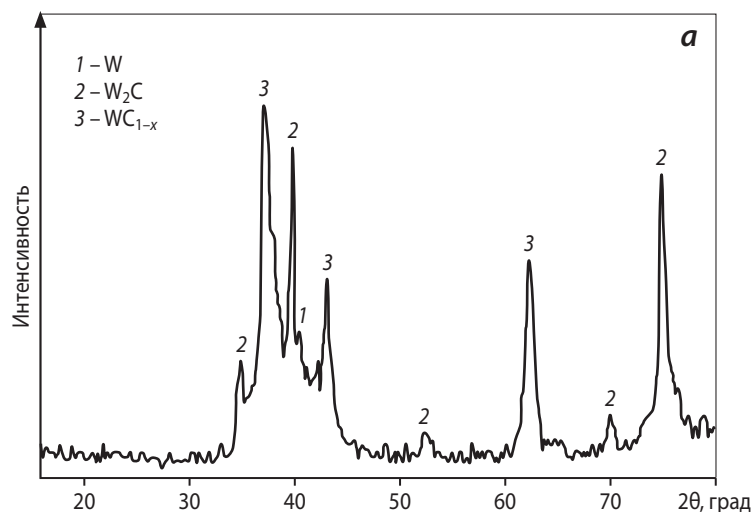


Рис. 2. Рентгенограмма (а) и микрофотография (б) порошков системы W–C после плазмохимического восстановительного синтеза

взаимодействии порошка оксида ванадия (V_2O_5) с углеводородами (метан, пропан) в азотной и азотно-водородной плазмах. Полученные в опытах продукты представляли собой нанопорошки с размером частиц $d < 50$ нм и имели $S_{уд} = 19 \div 51$ м²/г. По результатам РФА полученные композиции являются многофазными системами: преобладают V-содержащие фазы VC, VCO, V_2O_3 , VO_2 , V_2O_5 и также присутствует свободный углерод.

Синтез нанопорошков Cr–C осуществлялся в тех же условиях с применением в качестве Cr-содержащего сырья порошков хрома и оксида хрома. Фазовый состав образцов характеризуется наличием 4 карбидных фаз (Cr_7C_3 , Cr_2C , $Cr_{23}C_6$, Cr_3C_2), индивидуальных фаз (Cr и C), а в случае использования оксидного сырья – дополнительно фаз оксидов (CrO , Cr_2O_3 , Cr_3O_4). Доля карбидных фаз составляет 30–60 % для образцов, полученных из оксида хрома, и 85–88 % для порошков из хрома.

Использование для плазмохимического синтеза карбида тантала соответствующего пентахлорида позволяет получать нанопорошки с регулируемым химическим и гранулометрическим составами и удельной поверхностью от 5 до 50 м²/г.

Из результатов экспериментов следует, что при взаимодействии оксидов вольфрама, ванадия и хрома с углеводородами в плазменном реакторе синтез соответствующих высших однофазных карбидов не обеспечивается. Эта проблема может быть решена за счет последующей термообработки полученных в плазменном реакторе многофазных нанопорошков систем Me–C.

При проведении термообработки наноконпозиций системы W–C протекает ряд процессов. До температуры 200 °C фиксируется выделение небольшого количества влаги, при $t = 600 \div 700$ °C происходит водородное восстановление части оксидов, а начиная с 750 °C идет карботермическое восстановление наиболее трудновосстановимых оксидов. Максимальное восстановление наблюдается при $t = 850$ °C и заканчивается при 950 °C. За 1,0–1,5 ч содержание кислорода в порошке уменьшается от нескольких процентов практически до нуля.

Параллельно с восстановлением протекают 2 других процесса. Выше температуры 850 °C начинается синтез монокарбида вольфрама. Диффузия углерода в присутствующие в системе вольфрамсодержащие фазы (W, W_2C , β -WC) осуществляется достаточно медленно, но за счет малых расстояний

(частицы имеют линейные размеры $\sim 5 \div 20$ нм) образование WC протекает за 2–4 ч. Увеличение температуры синтеза уменьшает это время, но тут вступает в действие второй процесс – рекристаллизационный рост зерна карбида, который, в зависимости от размера исходных частиц и фазового состава, протекает в некотором интервале температур. Было показано, что чем больше в нанопорошке связанного углерода, т. е. чем больше карбидных фаз и меньше вольфрама, тем легче формируется монокарбид и ниже температура его образования, но также ниже температура начала рекристаллизационного роста частиц карбида. И наоборот, высокое содержание вольфрама в карбиде затрудняет формирование целевой фазы и увеличивает время процесса.

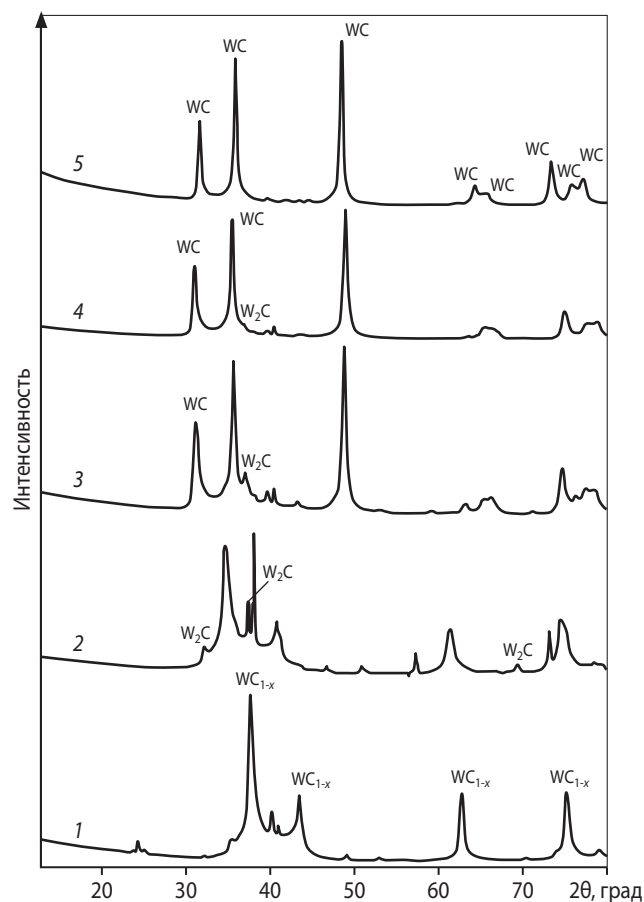


Рис. 3. Изменение фазового состава порошков системы W–C при термообработке, по данным РФА

Кривая	Режим синтеза		$S_{уд}$, м ² /г
	t , °C	τ , ч	
1	Исходный порошок		27,4
2	870	5	21,4
3	950	5	13,5
4	970	5	8,89
5	1030	5	6,9

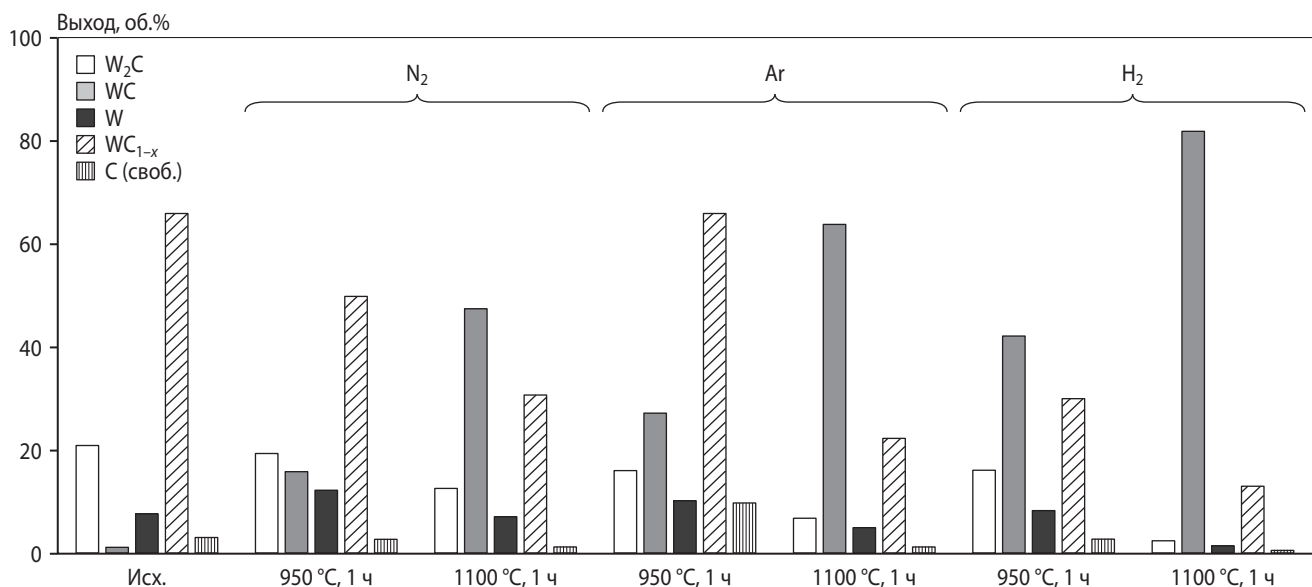


Рис. 4. Изменение фазового состава материала в зависимости от состава газовой фазы

Как было показано в [9], процесс науглероживания вольфрама осуществляется через C-содержащую газовую среду, что является чрезвычайно важным моментом в механизме образования карбида вольфрама (рис. 3).

Чтобы выяснить, какая газовая среда является предпочтительней, был проведен синтез нанопорошков системы W–C в средах N₂, Ar и H₂ при $t = 950\text{ °C}$ и 1100 °C , $\tau = 1\text{ ч}$. Максимальный выход целевой фазы – монокарбида вольфрама – был получен при использовании водорода, а в аргоне и особенно азоте результаты ниже (рис. 4). Повидимому, углерод в активной форме переносится на поверхность частиц в виде углеводородов, образующихся при взаимодействии H и C в порошке. Процессы прямого синтеза из вольфрама и углерода,

как известно из промышленной практики, протекают при значительно более высоких температурах.

Изучение влияния температуры и продолжительности синтеза на удельную поверхность порошков и содержание фазы α -WC показало, что резкий рост частиц происходит в первые 1,0–1,5 ч (рис. 5). За счет выбора времени процесса представляется возможным регулировать величину $S_{уд}$ (размер частиц) карбида вольфрама в широких пределах. Так, при исходном значении $S_{уд} \sim 40\text{ м}^2/\text{г}$ удается получить порошок с преобладающим количеством фазы α -WC с $S_{уд} > 20\text{ м}^2/\text{г}$, т. е. с $d = 20\text{ нм}$.

Синтез карбида при пониженных температурах, даже при том что, их размер на 2 порядка меньше, чем у стандартных порошков, – процесс длитель-

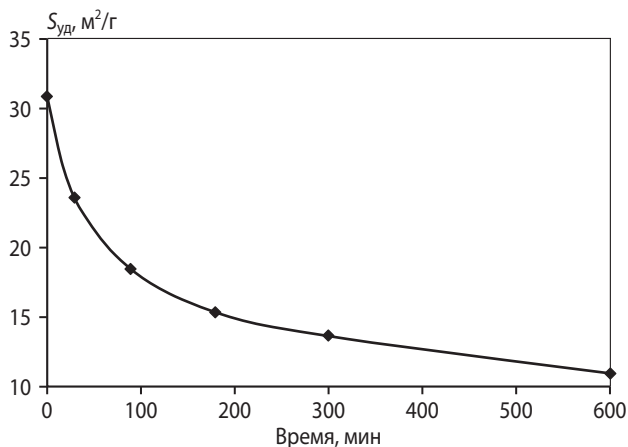


Рис. 5. Зависимость удельной поверхности порошка от времени синтеза WC при $t = 1030\text{ °C}$

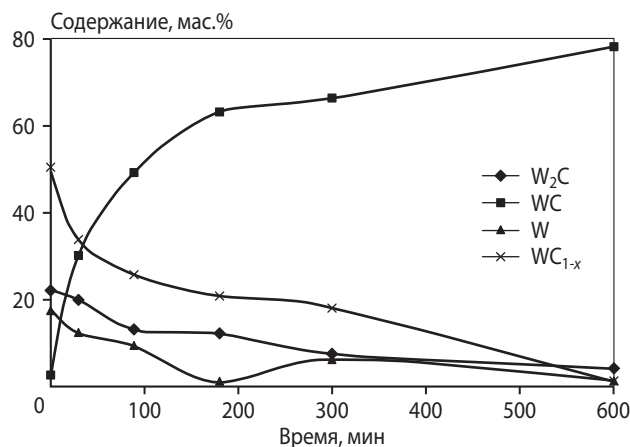


Рис. 6. Влияние времени синтеза на фазовый состав порошка при $t = 1030\text{ °C}$

ный. На рис. 6 показано изменение фазового состава порошка в зависимости от времени синтеза.

Увеличение температуры синтеза приводит к значительному укрупнению зерна WC, и при $t > 1050 \div 1100$ °C мы имеем уже обычные порошки субмикрометрового размера. После низкотемпературного синтеза образцы слегка агломерированы, однако это непрочные агломераты, они легко разрушаются при воздействии ультразвука или просто при перемешивании в жидкой среде.

Для получения нанопорошков карбидов ванадия и хрома использовались порошки, полученные в плазмохимическом процессе, с $S_{уд} = 48$ м²/г (V-C) и 23 м²/г (исх. порошок Cr). Условия синтеза были аналогичны получению WC: температура 1000 °C (и несколько выше) при времени термообработки 3 ч. Основной образующейся фазой карбида ванадия является V₈C₇. Характерная величина $S_{уд}$ составляла 25–35 м²/г. Выход карбида хрома при синтезе материала из оксидного сырья достигает 80 %, а при использовании порошков, полученных из металлического хрома, близок к 100 %. Их удельная поверхность регулируется в пределах 6–20 м²/г.

Традиционная технология получения твердосплавной шихты WC-Co заключается в перемешивании с размолот исходных порошков карбида вольфрама с кобальтом. Но для гомогенного смешения наноразмерных порошков применимость этого метода не изучена. Кроме того, проблема получения нанопорошков кобальта, соизмеримых по размеру с карбидом вольфрама, пока не решена, а при ее реализации появится новая – присутствие большого количества кислорода в Co-порошке.

Была разработана технология приготовления твердосплавной смеси WC-Co химико-металлургическим методом. Его принцип состоит в осаждении из раствора на наночастицы карбида соли кобальта с последующим ее восстановлением. Способ обладает рядом достоинств и некоторыми тонкостями, которые следует учитывать при его реализации. Принципиальным является тщательное перемешивание материалов, чтобы осаждение на порошок протекало равномерно в его объеме, а не на стенках емкости. Восстановление проводилось на той же установке, на которой исследовался синтез карбидов, при температуре 650–800 °C в течение 2 ч с расходом водорода, обеспечивающим полное восстановление

соли. После охлаждения порошок без контакта с воздухом выгружался в емкость, где хранился без доступа воздуха.

Содержание кислорода в материале в значительной степени определяет свойства твердого сплава, и поэтому важно его контролировать на всех стадиях получения. Порошки, полностью восстановленные в плазмохимическом процессе, могут содержать не более 0,1 мас.% O (рис. 7, а). За счет образования защитной пленки углерода они не подвержены заметному окислению. Реальную концентрацию кислорода в карбиде после синтеза измерить сложно, так как при выгрузке из реактора порошки активно поглощают кислород, и процесс сопровождается интенсивным их нагревом. Содержание кислорода после такой выгрузки, однако, составляет 0,2–0,4 мас.% (рис. 7, b и c). После получения смеси с кобальтом контакт с воздухом еще менее желателен, так как образуются оксиды как вольфрама, так и кобальта (рис. 7, c).

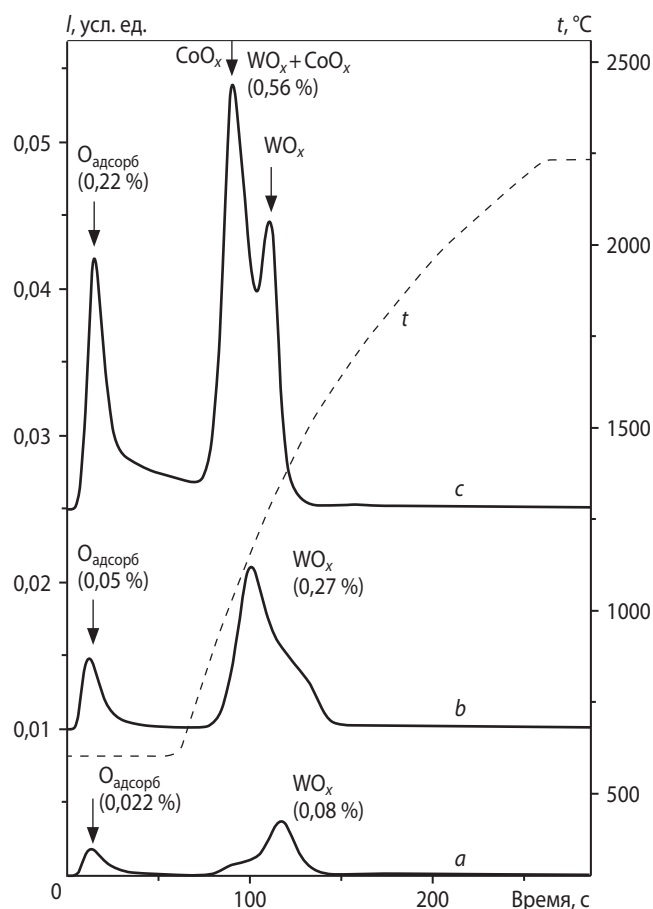


Рис. 7. Содержание адсорбированного кислорода в порошках W-C (а), WC (b) и WC-Co (c), определенное методом фракционного газового анализа

Разработанная методика позволяет получать твердосплавные порошковые смеси WC-Co с содержанием металла до 25 мас.%. При этом за счет равномерного осаждения Co на поверхности частиц WC изменения удельной поверхности не происходит до составов с 15 мас.% Co.

На рис. 8 показаны микрофотографии изломов прессовок нанопорошков WC и композиции WC-Co, демонстрирующие возможность получения нанопорошков с различной удельной поверхностью в зависимости от параметров проведения плазмохимического процесса. Для наглядности они имеют одинаковое увеличение.

ВЫВОДЫ

1. В процессе плазмохимического восстановительного синтеза получены многофазные порошки системы Me-C-(O) с удельной поверхностью 15–50 м²/г.

2. Исследование синтеза нанопорошков WC показало, что на их свойства влияют несколько факторов. Увеличение температуры и времени процесса повышает выход целевой фазы α-WC, однако при этом происходит рост частиц карбида вольфрама. Порошки карбида вольфрама с содержанием основной фазы, близким к 100 %, и $S_{уд} = 6 \div 8$ м²/г могут быть получены за 3–5 ч при $t = 970 \div 1050$ °C.

3. Карбиды хрома и ванадия были получены из соответствующих оксидов или металлов. Эти оксиды являются более трудновосстанавливаемыми соединениями, чем оксиды вольфрама, поэтому для синтеза карбида хрома предпочтительнее использование металлических порошков. Для получения нанопорошков карбида тантала был применен одностадийный плазмохимический метод – восстановление пентахлорида в водороде в присутствии углеводородов. Средний размер зерен всех получаемых карбидов-ингибиторов составлял менее 80 нм.

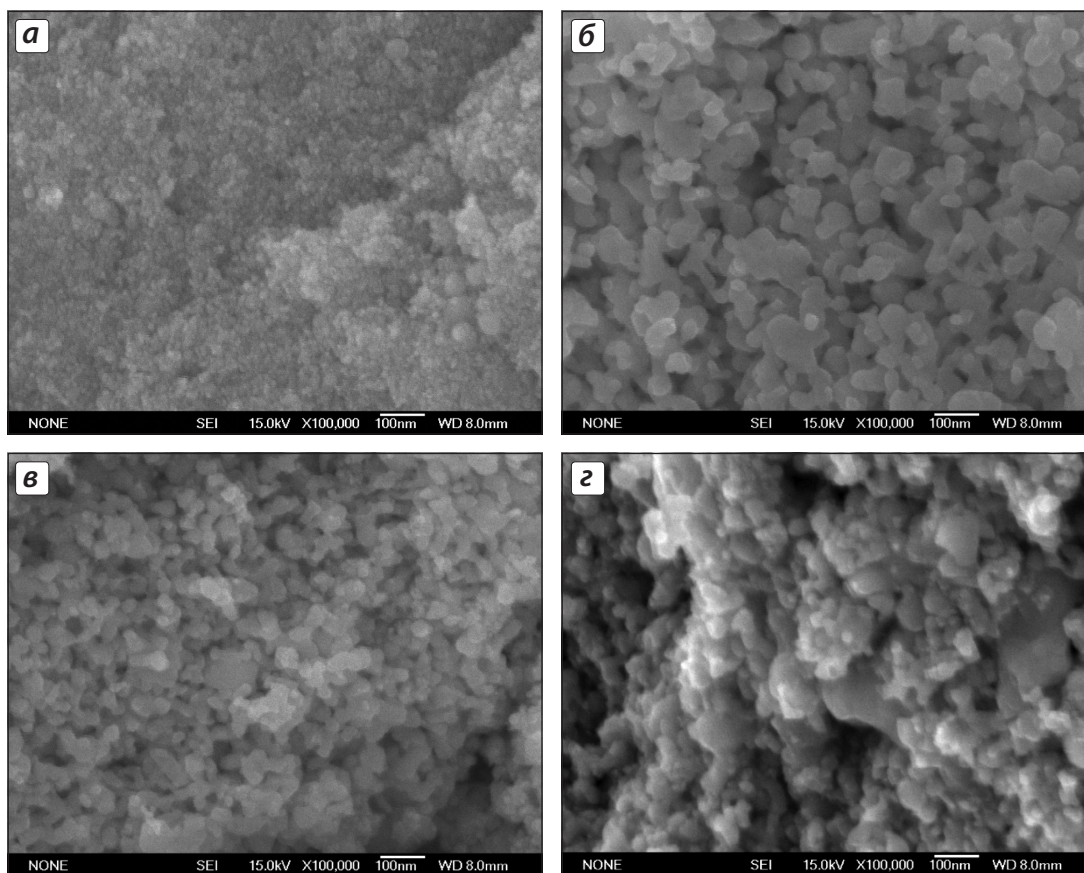


Рис. 8. Микрофотографии нанопорошков карбидов вольфрама (а–в) и композиции WC-Co (z)

а – смесь нанопорошков карбидов вольфрама, получаемая на первой стадии проведения плазмохимического процесса ($S_{уд} = 27$ м²/г); б и в – монокристалл вольфрама, синтезируемый в ходе низкотемпературного процесса ($S_{уд} = 6$ и 12 м²/г соответственно); z – порошок WC с нанесенным кобальтом в количестве 10 мас.% ($S_{уд} = 6$ м²/г)

4. Для получения гомогенной наноразмерной композиции «карбид вольфрама – кобальт» с введенными в нее добавками карбидов-ингибиторов была использована методика осаждения соли кобальта из раствора на поверхность твердых частиц при их интенсивном перемешивании и последующем восстановлении соли водородом. Показана возможность получения композиций с кобальтом в широком диапазоне его концентраций.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства образования
и науки Российской Федерации
(государственный контракт № 14.513.11.0037)
и гранта РФФИ № 13-03-00339 а.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Conner C. L. // Proc. 7 Inter. Tungsten Symp. (Goslar, Germany, Sept. 24–27. 1996). P. 171–179.
2. McCandlish L. E., Kear B. H., Kim B. K. // Nanostruct. Mater. 1992. № 1. P. 119.
3. Pat. 5352269 (USA). Spray conversion process for the production of nanophase composite powders / S. J. Bhatia, B. H. Kear, L. E. McCandlish. 1994.
4. Pat. WO 2000029325 A1 (pat. DE19852459A1 (Germany)). Способ изготовления карбида вольфрама посредством карбидизации в газовой фазе / J. Bredthauer, G. Gille, B. Gries. 2000.
5. Guo S. // Proc. 16-th Inter. Plansee Seminar. Tirol, Austria. HM17. 2005. Vol. 2.
6. Цветков Ю. В., Панфилов С. А. Низкотемпературная плазма в процессах восстановления. М.: Наука, 1980.
7. Пат. 2349424 (РФ). Способ получения порошков на основе карбида вольфрама / Ю. В. Благовещенский, А. В. Самохин, Ю. В. Цветков, Н. В. Алексеев. 2007.
8. Красовский П. В., Благовещенский Ю. В., Григорович К. В. // Неорг. материалы. 2008. Т. 44, № 9. С. 1074–1079.
9. Креймер Г. С., Эфрос Л. Д., Воронкова Е. А. // ЖТФ. 1952. Т. 22, № 5. С. 858–862.

УДК 669. 539.4. 54.057

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ ПЛАЗМЕННОЕ СПЕКАНИЕ НАНОСТРУКТУРНОГО КАРБИДА ВОЛЬФРАМА

Часть 1. Эксперимент

© 2013 г. **В. Н. Чувильдеев, Ю. В. Благовещенский, М. С. Болдин, А. В. Москвичева, Н. В. Сахаров, А. В. Нохрин, Н. В. Исаева, С. В. Шотин, Ю. Г. Лопатин, А. В. Писклов, Д. Н. Котков**

Научно-исследовательский физико-технический институт (НИФТИ)
Нижегородского государственного университета (ННГУ) им. Н.И. Лобачевского
Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова (ИМЕТ) РАН, г. Москва

В. Н. Чувильдеев – докт. физ.-мат. наук, проф., зам. директора по науке НИФТИ ННГУ (603950, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, 23, кор. 3). Тел.: (831) 462-31-85. E-mail: chuvildeev@nifti.unn.ru.

Ю. В. Благовещенский – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. ИМЕТ РАН (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 49). Тел.: (499) 135-77-53. E-mail: yuriblag@imet.ac.ru.

М. С. Болдин – мл. науч. сотр. НИФТИ ННГУ. E-mail: boldin@nifti.unn.ru.

А. В. Москвичева – вед. инженер НИФТИ ННГУ. E-mail: avmosk@nifti.unn.ru.

Н. В. Сахаров – мл. науч. сотр. НИФТИ ННГУ. E-mail: nvsaharov@nifti.unn.ru.

А. В. Нохрин – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., зав. лабораторией диагностики материалов НИФТИ ННГУ. E-mail: nokhrin@nifti.unn.ru.

Н. В. Исаева – инженер-исследователь ИМЕТ РАН. Тел.: (499) 135-77-53. E-mail: felix-2001@mail.ru.

С. В. Шотин – мл. науч. сотр. НИФТИ ННГУ. E-mail: shotin@nifti.unn.ru.

Ю. Г. Лопатин – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. НИФТИ ННГУ, E-mail: lopatin@nifti.unn.ru.

А. В. Писклов – инженер НИФТИ ННГУ. E-mail: metals@nifti.unn.ru.

Д. Н. Котков – вед. инженер НИФТИ ННГУ. E-mail: metals@nifti.unn.ru.

Проведены исследования высокоскоростной консолидации нанопорошков чистого карбида вольфрама методом электроимпульсного плазменного спекания («Spark Plasma Sintering»). Изучено влияние исходного размера наночастиц WC и режимов их получения на плотность, параметры структуры и механические свойства карбида вольфрама. Получены образцы высокоплотного наноструктурного карбида вольфрама с высокими значениями твердости (до 31 ГПа) и трещиностойкости (5,2 МПа · м^{1/2}).

Ключевые слова: карбид вольфрама, нанопорошки, электроимпульсное плазменное спекание, плотность, твердость, трещиностойкость, диффузия.