

УДК 621.762

**СИНТЕЗ КАРБИДОВ МЕТАЛЛОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ПРОВОДНИКОВ**

А.П. Ильин, О.Б. Назаренко, Д.В. Тихонов

Томский политехнический университет

E-mail: olganaz@tpu.ru

Ильин Александр Петрович, д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой общей неорганической химии Института физики высоких технологий ТПУ.

E-mail: genchem@mail.ru

Область научных интересов: физическая химия наноматериалов, горение, взаимодействие энергии высокой плотности мощности с металлами.

Назаренко Ольга Брониславовна, д-р техн. наук, профессор кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: olganaz@tpu.ru

Область научных интересов: физико-химические свойства нанопорошков, электрический взрыв проводников.

Тихонов Дмитрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетических систем Энергетического института ТПУ.

E-mail: dv_1@mail.ru

Область научных интересов: физико-химические свойства нанопорошков, электрический взрыв проводников.

Исследованы свойства нанопорошков карбидов вольфрама, титана, тантала, алюминия, полученных электрическим взрывом проводников в газообразных и жидких углеводородах. Установлено влияние условий синтеза на дисперсный и фазовый состав карбидов металлов. Обсуждается механизм формирования карбидов в процессе электрического взрыва проводников. Показано, что выход химических соединений зависит от их термической стабильности: наблюдается более высокий выход термически устойчивых карбидов.

Ключевые слова:

Карбиды металлов, нанопорошки, электрический взрыв проводников, углеводороды.

Введение

Тугоплавкие карбиды металлов широко используются в качестве основных материалов для изготовления режущих и фрезерных инструментов, износостойких деталей машин и конструкций благодаря уникальному сочетанию таких свойств как высокая температура плавления, хорошая тепловая и электрическая проводимость, высокая твердость и сравнительно высокая химическая инертность [1–5]. Характеристики твердых сплавов и композиционных материалов на основе карбидов зависят от размеров зерен карбидной фазы. Уменьшение размера зерна приводит к существенному улучшению физико-механических свойств материалов [6–8].

Традиционные методы получения тугоплавких карбидов основаны на прямой реакции порошков металла или оксида металла с углеродом при нагревании в течение нескольких часов [2]. Эти процессы являются энергоемкими, а высокие температуры синтеза (до 1800 °С) затрудняют получение наноразмерных порошков карбидов металлов.

Электрический взрыв проводников (ЭВП) в среде углеводородов приводит к формированию карбидов металлов, так как в процессе термической деструкции дают активные атомы углерода [9, 10]. Диспергирование металла при ЭВП в углеводородах сопровождается термическим распадом окружающей органической среды – высокотемпературным пиролизом, образующиеся при этом активные атомы углерода участвуют в образовании карбида металла. Ранее была исследована возможность синтеза карбидов металлов (Al_4C_3 , LaC_2 , TiC , ZrC , NbC , Ta_2C , MoC , Mo_2C и W_2C) с помощью ЭВП в газообразных углеводородах, таких как метан, этан, изобутан и ацетилен [11–13]. Показана необходимость разбавления ацетилена инертным газом для снижения степени разложения ацетилена до графита и водорода и получения чистых карбидов [12].

Из результатов работ [11, 12] следует, что ЭВП в газовых средах приводит к образованию продуктов, в составе которых в значительных количествах сохраняются остаточные ме-

таллы, а карбиды имеют дефицит по углероду. Для увеличения выхода карбидов и получения фаз, более насыщенных углеродом, необходимо повышать давление в разрядной камере или использовать более плотные конденсированные среды, при взрыве в которых концентрация активных реагентов существенно увеличивается. Принципиальная возможность синтеза карбидов металлов при пиролизе углеводородных жидкостей в процессе ЭВП была показана в работе [14], но подробные данные о свойствах продуктов взрыва отсутствуют.

Целью данной работы является экспериментальное исследование фазового и дисперсного состава нанодисперсных карбидов металлов при электрическом взрыве вольфрамовых, танталовых, титановых и алюминиевых проводников в зависимости от вида окружающей среды в разрядной камере и электрических характеристик взрыва.

Методика экспериментальных исследований

Принципиальная схема установки для получения нанопорошков карбидов металлов методом ЭВП показана на рис. 1. Установка работает следующим образом. От высоковольтного источника питания – 1 заряжается емкостной накопитель энергии – 2. Механизм подачи проволоки – 3 обеспечивает автоматическую подачу взрываемого отрезка проволоки – 4 в межэлектродный промежуток между высоковольтным – 5 и заземленным – 6 электродами. При достижении проволокой высоковольтного электрода – 5 срабатывает коммутатор – 7, происходит разряд емкостного накопителя на этот отрезок проволоки – и он взрывается. Образовавшийся порошок собирается в накопителе – 8. Очищенный от порошка газ с помощью вентилятора – 9 подается обратно в камеру. Объем разрядной камеры – 10 перед работой вакуумируется, а затем заполняется газовой атмосферой. Эти функции выполняет система газовой подачи – 11.

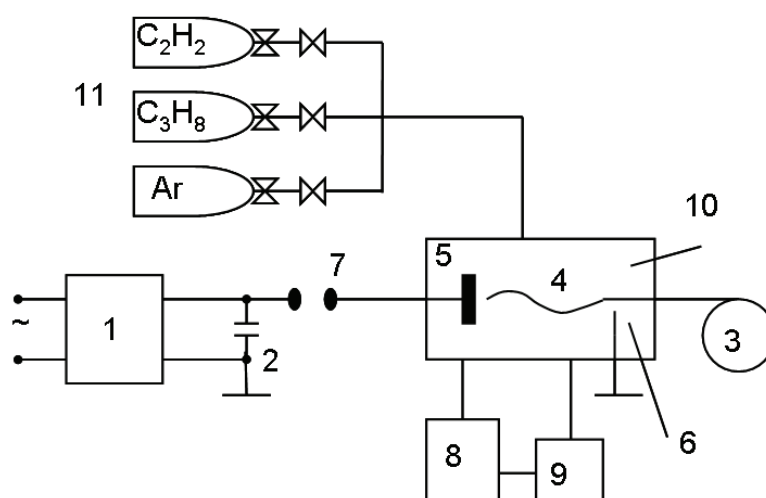


Рис. 1. Принципиальная схема установки для ЭВП в газовых средах: 1) высоковольтный источник питания; 2) емкостной накопитель; 3) механизм подачи проводника; 4) взрывающийся проводник; 5) высоковольтный электрод; 6) заземленный электрод; 7) коммутатор; 8) накопитель порошка; 9) вентилятор; 10) разрядная камера; 11) система газовой подачи

В качестве газовой атмосферы при производстве порошков карбидов металлов использовались следующие газы: 1) ацетилен и аргон с молярным отношением $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_2$ 9:1 и 4:1; 2) пропан и аргон с молярным отношением $\text{Ar}:\text{C}_3\text{H}_8$ 2:1. Давление рабочего газа в разрядной камере установки составляло $1,5 \cdot 10^5$ Па. Жидкие углеводороды гексан C_6H_{14} , бензол C_6H_6 , толуол $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ и декан $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ также были использованы в качестве рабочей среды для синтеза карбидов при ЭВП.

Вольфрамовые, танталовые, титановые и алюминиевые проводники диаметром 0,2...0,5 мм и длиной 50...120 мм взрывались в данных экспериментальных исследованиях. Электрический взрыв проводников осуществляли в режиме «быстрого взрыва» с бесконечной паузой тока и с дуговой стадией. Величина удельной введенной в проводник до взрыва энергии (e) регули-

ровалась путем изменения зарядного напряжения, величины зарядной емкости или длины взрывающегося проводника и принимала значения от 0,4 до $2,0e_c$ (e_c – энергия сублимации материала проводника). Энергия дуговой стадии (e_d) варьировалась от 0,5 до $1,6 e_c$. Параметры электрического контура экспериментальной установки: емкость накопителя энергии $C = 1...5$ мкФ; напряжение зарядки накопителя энергии $U = 12,5...30$ кВ; индуктивность разрядного контура $L = 0,58$ мкГн.

Полуколичественный фазовый анализ состава полученных порошков проводился с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3,0 с использованием $\text{Cu}_{K\alpha}$ -излучения медной трубки. Дисперсность и форма частиц определялась с помощью растрового электронного микроскопа JSM-840. Определение площади удельной поверхности ($S_{уд}$) порошков осуществлялось с помощью метода низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ). Термический анализ проводился с использованием термоанализатора SDT-600 Научно-аналитического центра Томского политехнического университета в режиме линейного нагрева в интервале $20...1000$ °C со скоростью нагрева 10 град/мин в атмосфере воздуха.

Результаты и их обсуждение

Порошки карбидов вольфрама. Исследование фазового состава продуктов электрического взрыва вольфрамовых проводников в ацетилен-аргоновой газовой среде показало, что полученные порошки содержат фазы β -WC (WC_{1-x}), W_2C , α -W и β -W. Относительное содержание карбидных фаз, определенное как отношение интенсивностей 100%-ных рефлексов фаз W_2C и WC_{1-x} на рентгенограммах, представлено в табл. 1

Таблица 1. Состав продуктов электрического взрыва вольфрамовых проводников в ацетилен-аргоновой газовой среде

e/e_c	e_d/e_c	Ar:C ₂ H ₂	W ₂ C:WC _{1-x}
0,9	0,4	9:1	0,55
0,7	0,1	4:1	0,47
0,8	0,2	4:1	0,34
0,9	0,4	4:1	0,20
0,9	1,5	4:1	0,12

Из анализа диаграммы состояния системы W-C [15] следует, что существует несколько кристаллических модификаций карбида вольфрама, отличающихся параметрами решетки: низкотемпературная α -WC, высокотемпературная β -WC и ряд модификаций W_2C .

Фаза W_2C имеет гексагональную плотнейшую решетку. В зависимости от температуры карбид вольфрама W_2C может иметь несколько кристаллических форм (α -, β - γ -, ϵ -фазы), отличающихся степенью упорядоченности атомов углерода в октаэдрических пустотах плотнейшей упаковки из атомов вольфрама или типом кристаллической решетки. Низкотемпературная модификация монокарбида вольфрама α -WC имеет простую гексагональную кристаллическую решетку. Высокотемпературная модификация β -WC кристаллизуется в виде плотнейшей гранецентрированной кубической решетки (ГЦК) и в отсутствие кислорода устойчива при температурах выше 2800 К. Фазу β -WC можно рассматривать как нестехиометрический ГЦК-карбид WC_{1-x} , где $0 \leq x \leq 0,41$.

Нестехиометрический карбид WC_{1-x} переходит через температуру упорядочения и стремится в упорядоченное состояние при охлаждении от температуры синтеза до комнатной температуры. Согласно [16, 17] превращения порядок-беспорядок в карбидах являются фазовыми переходами первого рода со скачкообразным изменением объема. В то же время процесс упорядочения является и диффузионным, поэтому превращение происходит не мгновенно, а в течение нескольких десятков минут. Высокие температуры синтеза карбидов вольфрама в процессе ЭВП и быстрое охлаждение образующихся порошков приводят к стабилизации метастабильного карбида WC_{1-x} .

При ЭВП в ацетилен-аргоновой смеси с молярным отношением $\text{Ar:C}_2\text{H}_2 = 4:1$ с повышением введенной в проводник энергии от $0,7e_c$ до $0,9e_c$ и энергии дуговой стадии от $0,1e_c$ до

1,5 e_c наблюдается снижение относительного содержания менее насыщенного углеродом карбида вольфрама W_2C и увеличение содержания фазы WC_{1-x} (табл. 1).

Уменьшение относительного выхода фазы W_2C по отношению к WC_{1-x} наблюдалось при снижении степени разбавления ацетилена аргоном с 9:1 до 4:1 молярных отношений. К увеличению относительного выхода фазы W_2C по отношению к WC_{1-x} привела замена ацетилена на пропан при молярном соотношении $Ar:C_3H_8 = 2:1$.

Электрическая дуга, возникающая после собственно взрыва проводника, приводит к увеличению дисперсности получаемых порошков (рис. 2). Например, площадь удельной поверхности порошков, полученных при $e/e_c = 0,9$, с повышением e_d/e_c от 0,4 до 1,5 увеличилась с 8,5 до 23,5 m^2/g . К увеличению дисперсности порошков привело также и снижение степени разбавления ацетилена аргоном с 9:1 до 4:1 молярных отношений. В результате изменения молярного отношения $Ar:C_2H_2$ с 9:1 до 4:1 относительное содержание W_2C уменьшается, а содержание более насыщенного углеродом карбида WC_{1-x} увеличивается. Замена ацетилена на пропан приводит к снижению площади удельной поверхности до 4,7 m^2/g .

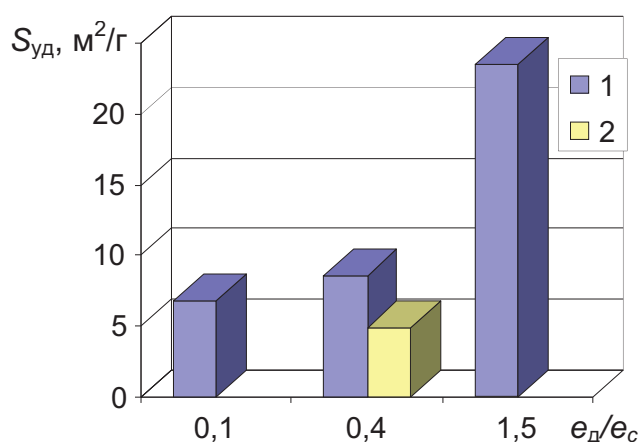


Рис. 2. Влияние дуговой стадии разряда и степени разбавления аргона ацетиленом на площадь удельной поверхности порошков карбидов вольфрама: $Ar:C_2H_2 = 4:1$ (1); 9:1 (2)

Согласно электронно-микроскопическим исследованиям, порошки карбида вольфрама, полученные при ЭВП в газообразных углеводородах, состоят из сферических частиц с диаметром от 0,01 до 2 μm , имеющих гладкую поверхность (рис. 3). Размер частиц имеет тенденцию к снижению при увеличении энергии, потребленной проводником до взрыва.

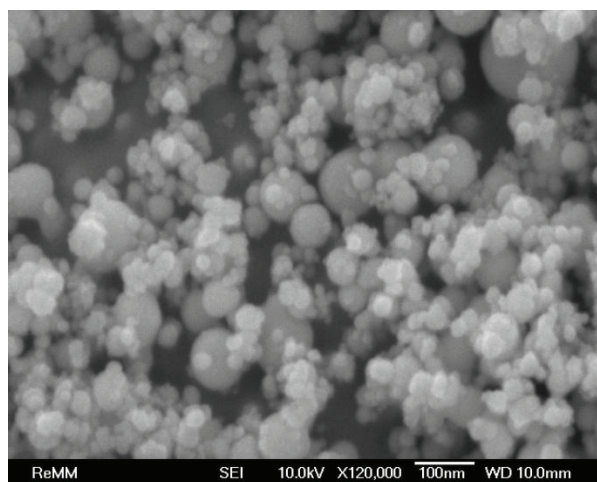


Рис. 3. Микрофотографии продуктов электрического взрыва вольфрамовых проводников в ацетилен-аргоновой газовой среде, $e/e_c = 0,9$, $e_d/e_c = 1,5$

При взрыве проводников в жидких средах концентрация активных реагентов значительно выше, чем при взрыве в газах, что позволяет увеличить выход химических соединений и изменить их фазовый состав [9, 18].

Согласно данным РФА продукты электрического взрыва вольфрамовых проводников в жидких углеводородах содержат карбиды вольфрама WC_{1-x} и W_2C с примесью остаточного вольфрама. На рис. 4 представлен полуколичественный состав продуктов электрического взрыва вольфрамовых проводников при введенной энергии $\sim 1,2e_c$ в зависимости от вида жидкого углеводорода. С ростом соотношения С/Н и повышением плотности жидкого углеводорода выход карбида вольфрама WC_{1-x} увеличивается, а содержание в продуктах металлического вольфрама снижается.

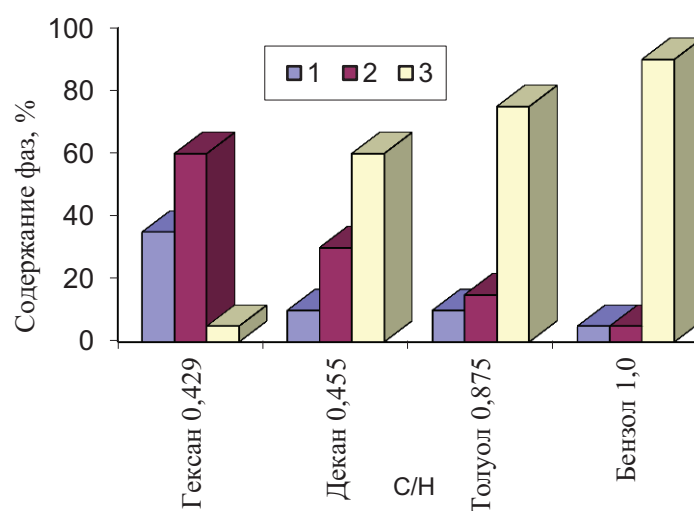


Рис. 4. Содержание фаз W (1), W_2C (2), и WC_{1-x} (3) в продуктах электрического взрыва вольфрамовых проводников в зависимости от соотношения С/Н в молекулах углеводородов

Влияние введенной в проводник энергии на фазовый и химический состав продуктов ЭВП в жидких углеводородах было исследовано с использованием в качестве окружающей среды декана $C_{10}H_{22}$. На рис. 5 показано относительное содержание фаз W, W_2C and WC_{1-x} в зависимости от величины e/e_c . Даже при максимальном в условиях проведенных экспериментов значении введенной в проводник энергии ($e/e_c = 1,2$) основным продуктом ЭВП в декане, согласно РФА, является ненасыщенный углеродом карбид WC_{1-x} .

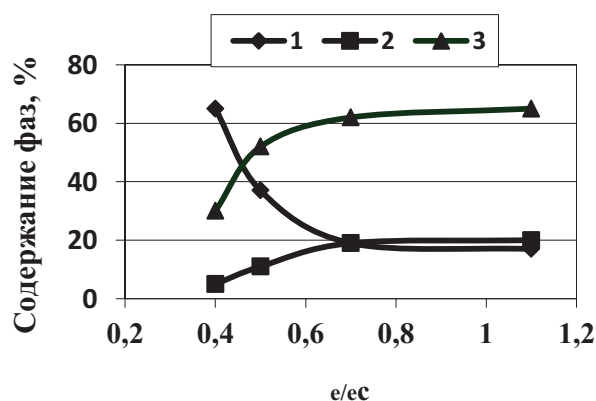


Рис. 5. Зависимость относительного содержания W (1), W_2C (2) и WC_{1-x} (3) в продуктах электрического взрыва вольфрамовых проводников в декане от введенной в проводник энергии

Порошки карбидов тантала. Порошки, полученные электрическим взрывом танталовых проводников в ацетилен-аргоновых смесях при различном соотношении газовых компонентов, содержат, по данным РФА, фазы α -Ta₂C и TaC, а также следы металлического α -Ta. Относительное содержание карбидных фаз в зависимости от энергетических характеристик представлено в табл. 2.

Таблица 2. Относительное содержание карбидных фаз в порошках, полученных электрическим взрывом танталовых проводников в ацетилен-аргоновой смеси

e/e_c	e_d/e_c	Ar:C ₂ H ₂	TaC:Ta ₂ C
0,95	0,1	4:1	1,6
0,95	0,1	9:1	0,5
1,25	0,4	4:1	4,7
1,25	0,4	9:1	2,2

Концентрация ацетилена в аргоне оказывает заметное влияние на фазовый состав конечных продуктов. Увеличение содержания фазы TaC по отношению к фазе α -Ta₂C наблюдается при уменьшении степени разбавления ацетилена аргоном с 9:1 до 4:1 молярных отношений (табл. 2). При равных степенях разбавления ацетилена аргоном увеличение содержания фазы TaC по отношению к фазе α -Ta₂C происходит при увеличении удельной введенной энергии и энергии дугового разряда.

Зависимость дисперсности от энергетических характеристик и степени разбавления ацетилена аргоном показана на рис. 6. При увеличении введенной энергии и энергии дуговой стадии ЭВП наблюдается рост площади удельной поверхности порошков. Увеличение концентрации ацетилена в аргоне (Ar:C₂H₂ = 4:1) также приводит к росту площади удельной поверхности, что в значительной степени является следствием роста содержания пиролитического графита в полученных порошках.

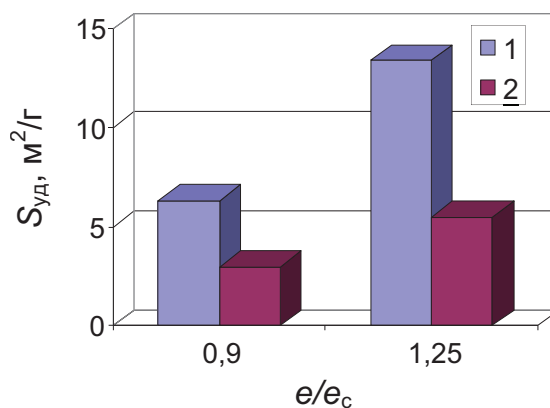


Рис. 6. Влияние удельной введенной в проводник энергии на площадь удельной поверхности порошков карбида тантала, полученных в ацетилен-аргоновых смесях с молярным соотношением 4:1 (1) и 9:1 (2)

Порошки карбида титана. Рентгенофазовый анализ порошков, полученных при электрическом взрыве титановых проводников в ацетилене, разбавленном аргоном в соотношении Ar:C₂H₂ = 9:1 при $e/e_c = 1,5$, показал, что они состоят только из карбида титана. Порошки, полученные при ЭВП в пропане, разбавленном аргоном в молярном соотношении Ar:C₃H₈ = 2:1, состоят из карбида TiC и металлического α -Ti.

Зависимость фазового состава порошков, полученных при ЭВП в жидком углеводороде – декане, от величины введенной в проводник энергии показывает, что с увеличением введенной в проводник энергии от 0,7 до 1,3 e/e_c наблюдается рост содержания карбида титана в конечных продуктах. Содержание остаточного титана невелико даже при $e/e_c = 0,7$ и составляет 15 %, а при $e/e_c \geq 1,3$ на дифрактограммах присутствуют рефлексы только карбида TiC.

Электронно-микроскопические исследования образцов продуктов электрического взрыва титановых проводников в газообразных и жидких углеводородах показали, что частицы сохраняют сферическую форму.

Условия формирования карбидов металлов при электрическом взрыве проводников

Диспергирование металла в процессе электрического взрыва сопровождается высокотемпературным пиролизом окружающей проводник среды. Образующиеся при этом активные атомы углерода участвуют в образовании карбидов металлов. Процесс образования химических соединений в условиях ЭВП ограничивается строго определенным диапазоном термодинамических параметров: давлением, температурой, концентрацией продуктов диссоциации в газообразной фазе и наличием или отсутствием конденсированной фазы. Средняя скорость охлаждения продуктов ЭВП составляет 10^7 К/с, но в области протекания химических процессов, ниже 5000 К, не превышает 10^3 К/с. Поэтому к анализу механизма химических реакций в условиях ЭВП может быть привлечен такой термодинамический параметр как изобарно-изотермический потенциал ΔG [9]. В процессе охлаждения при достижении пороговой температуры образования определенного химического соединения ($\Delta G < 0$) происходит формирование этого соединения. При температуре ниже 500 К скорости реакций малы. Уменьшение скорости химического взаимодействия связано с нарастанием торможения диффузии окислителя через слой образовавшегося карбида.

Для исследования условий формирования карбидов было проведено сравнение продуктов электрического взрыва вольфрамовых, титановых и алюминиевых проводников.

Основным продуктом электрического взрыва алюминиевых проводников в декане является металлический алюминий даже при высоком значении введенной в проводник энергии ($e/e_c = 1,5$). Относительное содержание карбида алюминия Al_4C_3 не превышает 40 %. При одинаковой введенной в проводник энергии выход карбида алюминия значительно меньше выхода карбидов вольфрама и титана (рис. 7). Низкий выход карбида алюминия при ЭВП можно объяснить, если проанализировать зависимость изобарно-изотермического потенциала ΔG реакции образования карбида алюминия от температуры [19, 20].

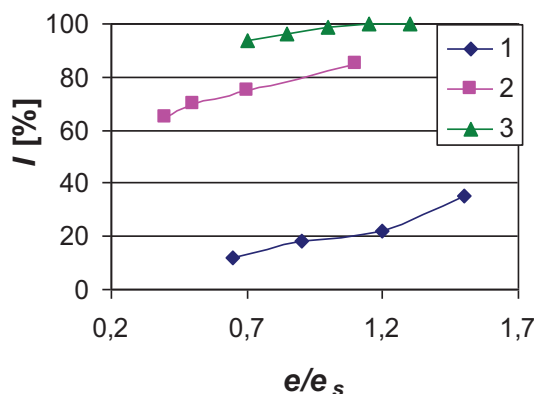


Рис. 7. Зависимость относительного содержания (100 %-ных рентгеновских рефлексов) Al_4C_3 (1), WC (2) и TiC (3) в продуктах ЭВП в декане от величины введенной в проводник

Температурный предел устойчивости карбида алюминия ограничивается 3000 К. В случае электровзрыва алюминиевых проводников в декане химическая реакция сначала протекает в газовой фазе, а затем, при более низких температурах, ниже температуры кипения алюминия (2720 К), за счет диффузии атомов углерода в частицу алюминия: $4Al_{(ж)} + 3C_{(г)} = Al_4C_{3(тв)}$. По мере протекания реакции на поверхности металлической частицы образуется сплошной слой карбида алюминия, ограничивающий диффузию атомов углерода к металлу.

Для карбидов вольфрама и титана верхняя граница температурной устойчивости существенно выше. Морфология частиц указывает на возможность образования карбидов вольфрама в виде жидкой фазы: частицы имеют сферическую форму с гладкой поверхностью. Следова-

тельно, в случае электровзрыва вольфрамового проводника за счет диффузии атомов углерода в частицу жидкого вольфрама происходит формирование жидкого карбида вольфрама: $2W_{(ж)} + C_{(г)} = W_2C_{(ж)}$. (для W_2C $T_{пл} \sim 3130$ К). Основным конечным продуктом взрыва вольфрамовых проводников в жидких углеводородах является нестехиометрический карбид вольфрама WC_{1-x} , что объясняется высокой концентрацией активных атомов углерода во время прохождения химической реакции и быстрым охлаждением образующихся порошков. Известно, что карбид вольфрама WC_{1-x} устойчив при температурах более 2800 К [19, 20]. Таким образом, высокий выход нанопорошков карбидов вольфрама является следствием более высокой их термической устойчивости в сравнении с карбидом алюминия. Аналогичное объяснение можно дать и высокому выходу карбидов титана в условиях ЭВП.

Заключение

Исследованы продукты электрического взрыва вольфрамовых, танталовых, титановых и алюминиевых проводников в газообразных и жидких углеводородах. Установлено, что факторами, влияющими на дисперсный, фазовый и химический состав образующихся порошков, являются энергия, введенная в проводник до взрыва, энергия дуговой стадии, свойства окружающей взрывающийся проводник среды.

Выход насыщенных углеродом фаз карбидов возрастает, а содержание остаточного металла в продуктах взрыва уменьшается с уменьшением степени разбавления ацетилена аргоном, с ростом отношения C/H в молекулах углеводородов и величины потребленной энергии.

Сравнение условий формирования карбидов алюминия, титана и вольфрама показало, что выход химических соединений зависит от их термической стабильности: наблюдается более высокий выход термически устойчивых карбидов вольфрама и титана по сравнению с менее устойчивым карбидом алюминия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стормс Э. Тугоплавкие карбиды. – М.: Атомиздат, 1970. – 304 с.
2. Тот Л. Карбиды и нитриды переходных металлов. – М.: Мир, 1974. – 294 с.
3. Самсонов Г.В., Упадхья Г.Ш., Нешпор В.С. Физическое материаловедение карбидов. – Киев: Наукова Думка, 1974. – 456 с.
4. Андриевский Р.А., Спивак И.И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе. – Челябинск: Металлургия, 1989. – 368 с.
5. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1986. – 190 с.
6. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: Наука–Физматлит, 2005. – 409 с.
7. Клячко Л.И., Фальковский В.А., Хохлов А.М. Твердые сплавы на основе карбида вольфрама с тонкодисперсной структурой. – М.: Руда и металлы, 1999. – 48 с.
8. Kim H.C., Jeong I.K., Ko I.Y., Doh J.M. Fabrication of WC–8 wt. % Co hard materials by two rapid sintering processes // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2007. – V. 25. – № 4. – P. 336–340.
9. Назаренко О.Б. Электровзрывные нанопорошки: получение, свойства, применение. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. – 148 с.
10. Ильин А.П., Назаренко О.Б. Проблемы совершенствования электровзрывной технологии получения нанодисперсных порошков // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2008. – Т. 51. – № 7. – С. 61–64.
11. Johnson R.L., Siegel B. Chemistry of electrical wire explosions in hydrocarbons // Journal of Electrochemical Society. – 1968. – V. 155. – № 1. – P. 24–28.
12. Cook E., Siegel B. Carbide synthesis by metal explosions in acetylene // Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry. – 1968. – V. 30. – № 7. – P. 1699–1706.

13. Siegel B., Johnson R.L. A thermal model of wire explosion in methane // Exploding Wires: Proceedings of the Conference on the Exploding Wire Phenomenon (4th). – N.Y.: Plenum Press, 1968. – V. 4. – 345 P.
14. Вишневецкий И.И. Исследование разложения углеводородов в импульсных электрических разрядах: дис. канд. техн. наук. – Томск, 1974. – 237 с.
15. Самсонов Г.В., Витрянюк В.К., Чаплыгин Ф.Ч. Карбиды вольфрама. – Киев: Наукова думка, 1974. – 73 с.
16. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
17. Гусев А.И., Ремпель А.А. Структурные фазовые переходы в нестехиометрических соединениях. – М.: Наука, 1988. – 308 с.
18. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Ушаков В.Я. Формирование химических соединений при электрическом взрыве металлических проводников в жидкостях // Известия вузов. Физика. – 1996. – № 6. – С. 9–13.
19. Куликов И.С. Термодинамика карбидов и нитридов: Справочник. – Челябинск: Metallurgia, 1988. – 320 с.
20. Термодинамические свойства неорганических веществ: Справочник / Ред. А.П. Зефилов. – М.: Атомиздат, 1965. – 460 с.

Поступила 04.04.2012 г.