

**Анализ возможности преобразования отходов  
вольфрамокобальтового композита в среде воздуха  
для процессов получения водорода  
металлопаровым методом**

В. С. Зенков, В. В. Пасичный

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины,  
Киев, e-mail: pasich2008@meta.ua

*Рассмотрено развитие окислительного процесса массивного образца вольфрамокобальтового сплава ВК8 в среде воздуха в условиях применения поверхностного нагрева при использовании солнечного концентратора. Получены кинетические данные этапов физико-химического взаимодействия композита с кислородом воздушной среды при температурах до 1000 °С. Исследуется механизм разрушения компактного образца в начальных и последующих стадиях преобразования в относительно низком температурном интервале 30—1000 °С.*

**Ключевые слова:** вольфрам, окисление, оксиды, кинетика окисления, термодинамический анализ.

При проведении анализа физических и химических свойств многокомпонентной гетерогенной системы с различным содержанием компонентов твердой фазы необходима исходная информация о составе, плотности, пористости испытываемого компактного композита. Необходимым условием является также наличие информации о реакционной активности композита в окислительных и восстановительных газовых средах, кинетике преобразования исходного материала при определённых термодинамических параметрах — концентрации компонентов, температуре, давлении газообразных составляющих. Эти данные необходимы для разработки и оптимизации технологических процессов термохимической переработки компактного композита в гетерогенных системах газ—твёрдое тело с целью регенерации, извлечения составляющих элементов из отходов производства или отработанных и вышедших из строя изделий многоэлементных материалов. Исследование кинетических преобразований массы композита проводили при использовании концентратора солнечной энергии СГУ-7 гелиобазы ИПМ НАН Украины.

Окислительные процессы классических образцов вольфрама изучались рядом авторов [1, 2]. Однако интересно проследить за развитием окислительных процессов массивных образцов вольфрамовых композитов, получить представление о механизме разрушения в начальных стадиях преобразования, в том числе и при относительно низких температурных интервалах (до 1000 °С).

В ходе исследования важна первоначальная информация о реакционной поверхности преобразуемого композита для определения основных кинетических параметров протекаемых процессов. У спеченного плотного

© В. С. Зенков, В. В. Пасичный, 2013

композиционного изделия начальная реакционная поверхность обычно близка к его геометрической поверхности. Следует учесть, что массивные, крупногабаритные изделия, поступающие для исследования их жаропрочности или для их преобразования при использовании окислительных и восстановительных процессов в гетерогенной системе газ—твердое тело, могут быть произвольных формы и размера. В связи с этим актуальна задача определения поверхности исходного материала. Это достигается методом приближения произвольной формы исследуемого материала к шарообразному, кубическому или другому классическому виду.

При определении реакционной поверхности и пористости исходного материала необходимо знать его плотность  $\rho_{уд}$  или удельный объем  $V_{уд}$ , которые изменяются в зависимости от состава компактных многокомпонентных композитов. Для установления средней плотности многокомпонентного композита, содержащего вещества с различными плотностями, применяли метод определения средней гармонической величины [3]. Средняя гармоническая величина  $x_i$  элементов с плотностями  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i$  является величиной  $\rho_{ср}$ , обратное значение которой равно среднему арифметическому обратных значений  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i$ :

$$1/\rho_{ср} = (1/\rho_1 + 1/\rho_2, \dots + 1/\rho_i) / x_i, \quad (1)$$

где  $x_i$  — количество компонентов.

Исследуемый материал ВК8 массой 28,7759 г содержит  $n_1 = 92\%$  карбида вольфрама и  $n_2 = 8\%$  кобальта. Их плотности составляют 15,63—15,8 и 8,92 г/см<sup>3</sup> соответственно. Если состав материала выражен в процентах ( $n_1 + n_2 + \dots + n_i = 100\%$ ), формула приобретает вид

$$100/\rho_{ср} = (n_1/\rho_1 + n_2/\rho_2, \dots + n_i/\rho_i) / x_2. \quad (2)$$

Используя выражение (2), вычисляем среднюю плотность представленных для исследования композитов.

Таким образом, зная массу композита любого состава, можно определить её теоретически беспористый объем, условно приведенный к шарообразной форме, по формуле

$$V_{уд} = m / \rho_{ср} = (1/6) \cdot \pi d^3, \quad (3)$$

и определить диаметр исследуемого образца

$$d = \sqrt[3]{\frac{6m}{\rho_{ср} \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{6m}{\rho_{ср} \cdot \pi}} \quad (4)$$

Используя полученные значения объема беспористого материала, можно определить пористость исследуемого материала. Поры материала могут оказывать существенное влияние на развитие окислительных процессов в гетерогенной системе газ—твердое тело. В производственных условиях, исходя из предположения, что полученные гранулы материала имеют условную геометрическую форму шара или куба, возможна оценка их поверхности. Из соотношения

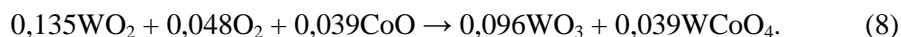
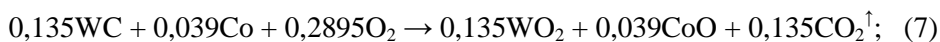
$$m / \rho_{ср} S = V_{уд} / S = \pi d^3 / 6\pi d^2, \quad (5)$$

где  $m$  — масса композита, определяем поверхность частиц выбранной фракции со средним диаметром частиц  $d_{ср}$

$$S = 6m / \rho_{ср} d_{ср}. \quad (6)$$

В эксперименте масса испытываемого образца составляла 28,7759 г. Средняя плотность испытываемого композита ВК8  $\rho_{\text{ср}}$ , определённая по формуле (2), равна 14,743 г/см<sup>3</sup> (данные плотности ВК8, по справочнику Г. В. Самсонова, находятся в интервале 14,4—14,8 г/см<sup>3</sup>). Объём испытываемого образца  $V = 1,95\text{ см}^3$ , поверхность  $S = 7,55\text{ см}^2$ .

Гетерогенный процесс окисления ВК8 в кислородсодержащей среде в системе газ—твёрдое тело протекает без учёта промежуточных стадий по следующим реакциям:



Реакции приведены со стехиометрическими коэффициентами элементов, соответствующими содержанию молей элементов в массе образца сплава ВК8.

При определении кинетических показателей рассматриваемой реакционной системы должен учитываться компенсационный эффект изменения массы объекта. Компенсационный эффект связан с уменьшением массы твёрдой фазы за счёт удаления углерода, который переходит в газовую фазу в виде оксидов, и прироста массы в процессе окисления металлических составляющих композита. Исходя из выбранной схемы преобразования композита, представленной реакциями (7), (8), анализировали условия термодинамической стабильности системы. Определяли также кинетические параметры многостадийного окислительного процесса вольфрамового композита кислородом воздуха со сложным механизмом протекания параллельных и последовательных реакций.

Для определения вероятности протекания процесса разложения карбида вольфрама, который входит в состав образца ВК8, рассматривали равновесное состояние системы W—C (рис. 1) в зависимости от температуры. Как видно из диаграммы, диссоциация карбида вольфрама в инертной среде аргона начинается в интервале температур 500—650 °С. Термодинамически допускается образование углерода и W<sub>2</sub>C. Происходит термодинамически вероятное структурно-фазовое превращение в твёрдом теле, облегчающее взаимодействие реагентов в системе газ—твёрдое тело. Образование металлического вольфрама термодинамически допуска-

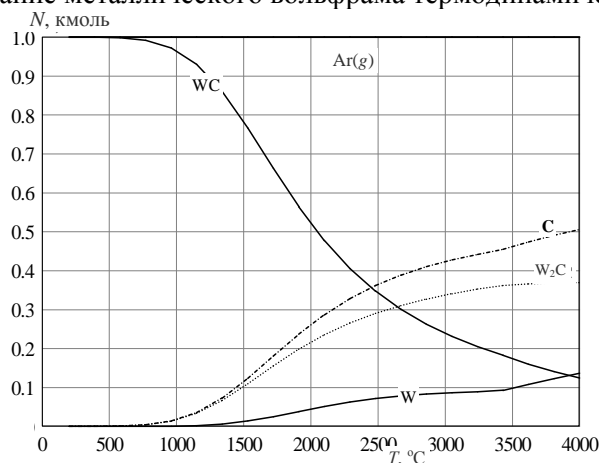


Рис. 1. Равновесная диаграмма разложения карбида вольфрама в среде аргона.

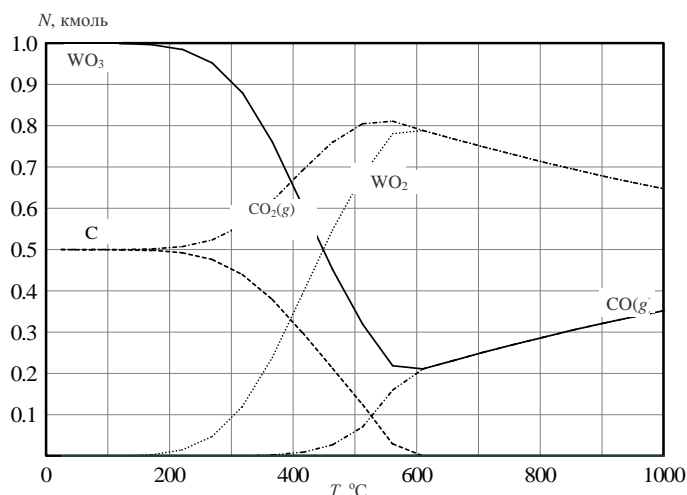


Рис. 2. Равновесная диаграмма взаимодействия WC с кислородом при стехиометрическом дефиците кислорода в реакции окисления карбида вольфрама до  $WO_3$  ( $N_{O_2} = 2$ ).

ется выше  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Для равновесного состояния системы W—C, в которой происходит полное разложение карбида вольфрама, необходима более высокая температура.

В связи с этим для преобразования композита более рационально применять окислительные процессы, протекающие в среде воздуха с последующим отделением оксидов вольфрама из смеси оксидов металлов. В условиях соблюдения концентраций реагентов, соответствующих стехиометрическим коэффициентам, образуются высшие оксиды реагентов  $WO_3$  и  $CO_2$ . В этом случае диаграмма состоит из двух совпадающих линий при  $N = 1$  кмоль. Однако в реальных условиях при протекании процесса стехиометрия не соблюдается. Образуются квазиравновесные состояния с нестехиометрическим содержанием компонентов. При этих состояниях возможно образование промежуточных продуктов реакции, соответствующих состоянию дефицита каких-либо компонентов.

На рис. 2 приведено равновесное состояние системы W—C—O при дефиците кислорода в реакции окисления до  $WO_3$  ( $N_O = 2$ ). Как видно, окисление карбида вольфрама до триоксида вольфрама с образованием углерода и  $CO_2$  энергетически более выгодно при температурах до  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . В интервале температур  $200\text{—}600\text{ }^\circ\text{C}$  происходит потенциальное увеличение фазы  $WO_2$ , уменьшение содержания углерода и повышение количества CO и  $CO_2$ . До  $450\text{ }^\circ\text{C}$  преобладает содержание триоксида вольфрама, при более высоких температурах в условиях дефицита кислорода в смеси оксидных фаз — фаза  $WO_2$ .

С учётом полученных термодинамических данных проведены кинетические исследования окислительного процесса. На рис. 3 представлена зависимость массы компактного образца вольфрамокобальтового композита ВК8, приведенной к единице поверхности, в процессе окисления его в среде воздуха при повышении температуры от  $30$  до  $970\text{ }^\circ\text{C}$ . Просматриваются несколько этапов окислительного процесса (кр. 2). На первом этапе преобразования композита, в интервале температур  $30\text{—}700\text{ }^\circ\text{C}$ , наблюдается активационный период с незначительным увеличением

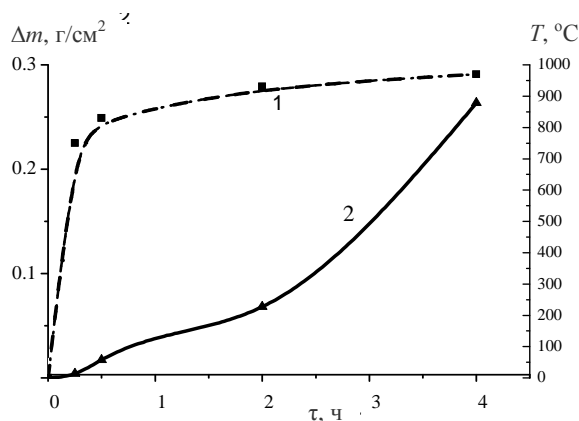


Рис. 3. Зависимости температуры (1) и прироста массы (2) на единицу поверхности образца от длительности окислительного процесса при повышении температуры до 970 °С.

массы образца при взаимодействии элементов композита с кислородом воздуха. Активационный период в

данном интервале неизотермического режима проведения процесса связан в основном с инерционным периодом прогрева массивного образца не только по объёму, но и по поверхности за счет теплопроводности испытываемого материала (в условиях поступления солнечной лучистой энергии на внешне доступную часть поверхности).

На втором участке, в интервале температур 700—900 °С, прирост массы образца в единицу времени повышается. Это обусловлено прогревом поверхности и, соответственно, увеличением площади передачи тепла внутрь объёма материала в условиях поверхностного нагрева на солнечной установке. Наблюдается уменьшение скорости процесса по мере блокировки реакционной поверхности образующимися оксидами.

На третьем участке, в интервале времени поднятия температуры до 900—950 °С, прирост массы становится постоянным в связи с переходом кинетической стадии в диффузионную стадию окислительного процесса. На последнем участке проявляется вторичное увеличение массы компактного массивного образца ВК8 в единицу времени.

Следует отметить, что представленные количественные данные реакционной активности поверхности твердой фазы, в области которой протекают кинетические и диффузионные стадии окислительного процесса, не отражают продвижения фронта реакции по объёму исследуемой компактной массы образца.

На рис. 4 представлены зависимости степени окисления  $\alpha$ , скорости и температурного режима окислительного процесса компактного композита от времени. Графические зависимости, приведенные на рис. 3 (кр. 2) и на рис. 4 (кр. 2), по виду идентичны. Однако величины степени окисления преобразуемого материала дают дополнительную информацию об объёмном превращении анализируемой конкретной массы компактного композита во времени. Здесь протекает окислительный процесс по мере продвижения реакционной зоны от границы раздела фаз газ—твёрдое тело в глубину преобразуемого первоначально низкопористого материала.

В начальный момент взаимодействия твёрдого тела с реакционной газовой средой процесс протекает в кинетической области, то есть реакционная зона находится на границе раздела фаз газ—твёрдое тело. На этой стадии скорость процесса лимитируется скоростью химической реакции окислителя газовой фазы (кислорода воздуха) с поверхностными атомами металлов твёрдой фазы. Как видно на рис. 4 (кр. 1), в начальный момент скорость окислительного процесса возрастает на протяжении

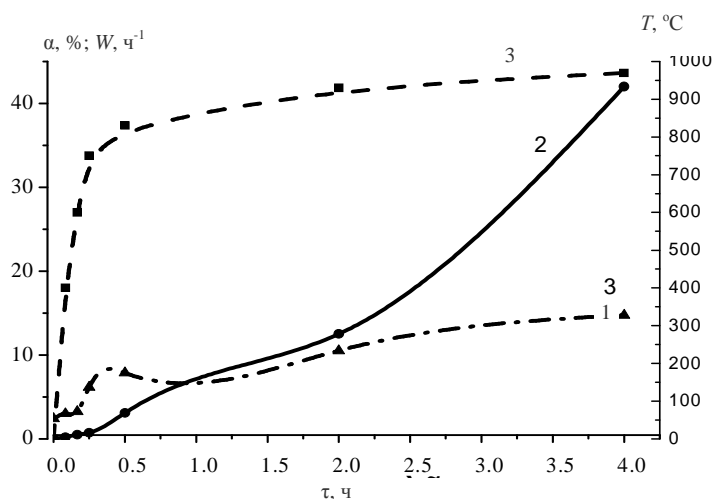


Рис. 4. Зависимости скорости  $W$  (1), степени  $\alpha$  (2) и температуры  $T$  (3) окисления компактного композита BK8 объёмом  $1,95 \text{ см}^3$  (до  $\text{WO}_3$  и  $\text{CoO}$ ) от времени.

периода активации и кинетической стадии взаимодействия кислорода воздуха с поверхностными слоями элементов металлического композита. Максимальная скорость достигается при степени окисления, близкой к 2%. После этого скорость окислительного процесса начинает уменьшаться по мере увеличения степени окисления. В интервале значений степени окисления 7—8% наблюдается стабилизация процесса. Это объясняется переходом в диффузионную стадию проникновения кислорода воздушной среды во внутренние слои приповерхностного слоя компактного материала. Вторичное повышение скорости окислительного процесса происходит при  $\alpha > 8\%$  и продолжается до степени окисления, близкой к 42%. Данное явление обусловлено изменением структуры массивного образца. По мере структурного преобразования имеет место развитие реакционной поверхности, которое зависит от величины степени окисления, то есть увеличения оксидной фазы элементов.

На рис. 5 представлены зависимости первой и второй производной степени превращения окислительного процесса в среде воздуха от времени при повышении температуры в реакционной системе от температуры окружающей среды до  $970 \text{ }^\circ\text{C}$ . На кривой 3 наблюдаются два максимума и два минимума развития окислительного процесса. В начальный момент, в области степени окисления, близкой к 1%, происходит изменение знака второй производной от положительного на отрицательный — первый минимум второй производной. Имеет место окислительный процесс компактного материала при взаимодействии с кислородом воздуха. На первом этапе окислительного процесса поверхность исследуемого материала можно считать постоянной величиной и скорость процесса зависит от поверхностной концентрации реагентов и температуры реакционной системы. Максимум второй производной наблюдается в интервале 2—3% степени окисления. Это свидетельствует о смене механизма окислительного процесса. По мере блокировки реакционной поверхности продуктами реакции гетерогенный процесс в системе газ—твёрдое тело переходит в диффузионную область взаимодействия. Второй минимум

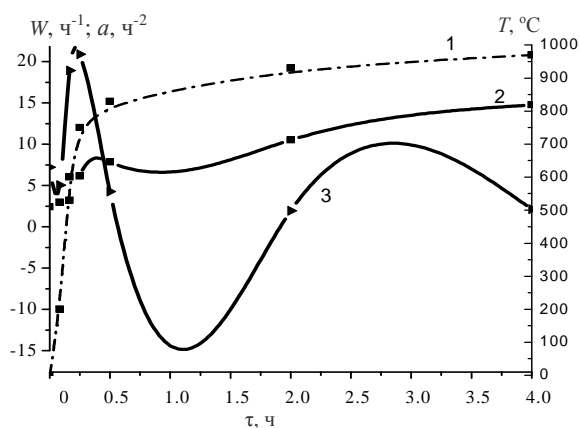


Рис. 5. Зависимости от времени температуры  $T$  (1), скорости  $W$  (2) и ускорения  $a$  (3) процесса окисления вольфрамового композита.

второй производной (рис. 5, кр. 3) фиксируется при степени окисления  $\sim 8\%$ . Скорость в рассматриваемой стадии увеличивается (кр. 1). Процесс имеет  $S$ -образную зависимость

(рис. 4, кр. 2). С развитием стадий преобразования компактной массы композита в среде воздуха снова происходит изменение знака второй производной с отрицательного на положительный. Это указывает на изменение механизма окисления массивного образца. На этой стадии увеличивается поверхность в связи с объёмными преобразованиями компактного материала, которые определяются кристаллохимическими несоответствиями исходной и образующихся фаз. Объёмное разрушение композита облегчает доступ окислителя к реакционной зоне взаимодействия кислорода воздуха с металлами. Реакция окисления активизируется и, как видно на рис. 4 и 5, ускоряется по мере изменения структуры образца и дополнительного развития реакционной поверхности. В зависимости от размера окисляемого материала эти циклы могут повторяться. Об этом свидетельствует повторная тенденция к изменению знака второй производной с положительного на отрицательный при степени окисления, близкой к 22%.

Как следует из приведенных кинетических данных, окисление композита ВК8 довольно сложный комбинированный многостадийный процесс. В начальный период имеет место незначительный по времени период активации и кинетическое и диффузионное взаимодействие реагентов. В дальнейшем зависимость повторно приобретает  $S$ -образный характер. Но эта зависимость уже объясняется развитием поверхности вследствие фазового преобразования исследуемого образца и его разрушением, зависящим от объёмного или поверхностного преобразований. Следует отметить, что для разных материалов это явление будет проявляться индивидуально и, соответственно, зависимости будут отличаться.

В рассматриваемом случае скорость суммарного процесса окисления компактного образца ВК8 зависит как от скорости химической реакции, которая лимитирует процесс начальной стадии, так и от скорости диффузии окислителя в глубинные слои композита. Однако, как следует из изложенного, при окислительных процессах крупногабаритных образцов лимитирующей заключительной стадией может являться также развитие реакционной поверхности в гетерогенной системе газ—твёрдое тело. Последний этап облегчает доступ окисляющего реагента в реакционную зону. Поверхность становится переменной величиной и тогда полное приращение скорости окисления выражается полным дифференциалом

$$dW = \frac{\partial W}{\partial \tau} d\tau + \frac{\partial W}{\partial S} dS, \quad dW = \frac{\partial W}{\partial \tau} d\tau + \frac{dW}{dS} dS, \quad (9)$$

где  $W$  — скорость реакции,  $\text{ч}^{-1}$ ;  $\tau$  (ч) и  $S$  ( $\text{см}^2$ ) — время и площадь соответственно.

Исходя из полученных кинетических данных, можно предположить, что в определённой области изменение скорости процесса полностью зависит и лимитируется изменением поверхности:

$$W_2/W_1 = S_2/S_1. \quad (10)$$

Появляется возможность определения поверхности исследуемого материала:

$$S_2 = W_2 S_1 / W_1. \quad (11)$$

Исходя из полученных кинетических данных скорости реакции в интервале времени протекания процесса 1,2—2,75 ч, получаем величину реакционной поверхности в конечной точке регистрации кинетических данных  $S = 15,3 \text{ см}^2$ . Для следующего интервала времени характерна тенденция перехода процесса в лимитирующую диффузионную стадию.

При анализе кинетических данных с использованием программы “OriginPro8” получена зависимость степени превращения испытываемого образца ВК8 в процессе окисления в среде воздуха от времени с учётом происходящих физических преобразований (в том числе изменения поверхности) испытываемого материала

$$\alpha = \frac{\alpha_{\max}}{1 + \left( \frac{\alpha_{\max} - \alpha_i}{\alpha_i} \right) \cdot e^{-5W_{\max} \frac{\tau}{\alpha_{\max}}}} \quad (12)$$

где  $\alpha$  — степень преобразования в заданное текущее время ( $\tau$ , ч) (%);  $\alpha_{\max}$  — максимальная степень преобразования объекта (%);  $\tau$  — текущее время эксперимента (ч);  $W_{\max}$  — максимальная скорость процесса, определяемая из полученных экспериментальных данных, представленных на рис. 4 и 5;  $\alpha_i = 5W_{\max}(\tau/\alpha_{\max})$  — степень превращения, учитывающая изменение поверхности в текущее время.

Как видно на рис. 6 зависимости, полученные при использовании формулы (12), практически не отличаются от зависимостей, полученных экспериментально. Имея экспериментальные данные не полностью проведенного процесса, применяя метод экстраполяции переменных величин, можно получить графическую зависимость полностью проведенного процесса при использовании приведенной формулы.

На рис. 7 представлен исходный вид компактного образца и после преобразования в процессе окисления в среде воздуха при использовании концентратора солнечной энергии СГУ-7. Следует отметить, что эксперименты проводили при ударном воздействии лучистой энергии на поверхность образца. Температура поверхности образца возрастала в течение короткого времени до

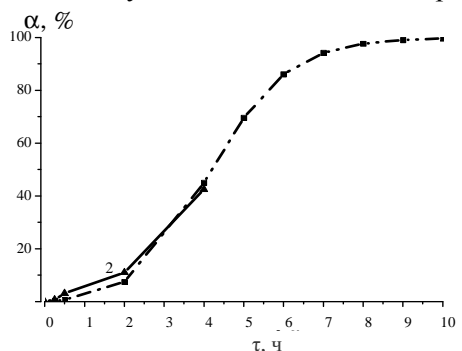


Рис. 6. Теоретическая (1) и экспериментальная (2) зависимости степени окисления ВК8 от времени.



максимально возможной. Температурный градиент по объёму и поверхности образца, наблюдавшийся на начальном этапе эксперимента, может вносить существенные изменения в исследуемый процесс в сравнении с условиями проведения постепенного нагрева изделия до заданной температуры.

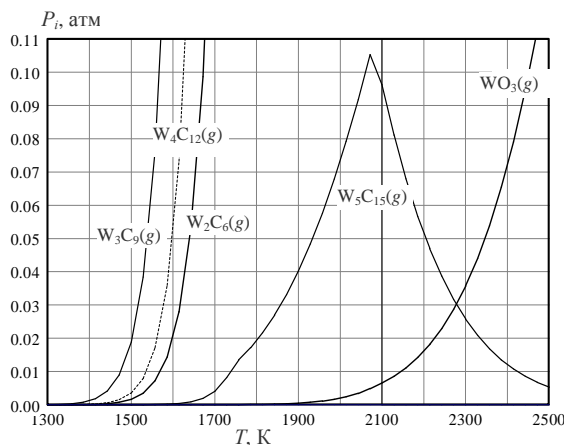
Исходный вольфрамокобальтовый образец ВК8 перед процессом окисления в среде воздуха на гелиоустановке СГУ-7 представлен на рис. 7, *а*. Образец имеет металлические признаки, цвета побежалости не наблюдаются. По мере воздействия лучистой энергии на поверхность образец изменяется. После облучения в течение 15 и 30 мин при температуре 700 °С происходит окисление поверхности образца в среде воздуха, но прирост массы и степень окисления незначительны (рис. 3, кр. 2). Это объясняется начальным химическим взаимодействием кислорода воздуха с довольно плотной поверхностной массой. Окисляются поверхностные слои материала. В начальный момент процесс идет в кинетической области, зависимой только от химического сродства элементов исследуемого материала. При этом в начальный момент скорость реакции взаимодействия кислорода воздуха с компактным образцом при незначительной степени окисления максимальна, но с тенденцией быстрого её снижения (рис. 3, кр. 2, рис. 5, кр. 3). Вторая производная имеет положительное значение. Наблюдается уменьшение ускорения процесса, ведущего к минимальному значению второй производной.

Следующий этап окислительного процесса исследовали в температурном интервале 750—850 °С. На рис. (7, *з*) представлен образец после часового облучения. Скорость процесса на данном этапе исследования резко уменьшается (рис. 3, 4). Приведенный вид образца соответствует моменту, когда вторая производная процесса стремится к минимальному значению, следовательно, скорость окисления также минимальна. Процесс переходил в диффузионную область. Как видно на рис. 7, по мере увеличения степени окисления композита происходит растрескивание поверхности, а также изменение геометрической формы образца испытываемого материала. На данном этапе степень окисления приближается к 10%, на поверхности реактора наблюдаются следы осаждённого сублимированного триоксида вольфрама. Присутствие сублимационного эффекта указывает на то, что в зоне прямого воздействия солнечной энергии на



Рис. 7. Вид исходного образца (*а*) и после нагрева в течение 15 (*б*), 30 (*в*) и 60 мин (*г*).

Рис. 8. Зависимость парциального давления паров оксидов вольфрама от температуры [4].



поверхность компактного образца температура превышала 1000 °С. На поверхности образца видны локальные участки несублимированного триоксида вольфрама. Эти участки, вероятно, находились в зоне температур ниже 1000 °С.

На рис. 8 приведены зависимости парциального давления паров оксидов вольфрама от температуры. Как видно, сублимация фазы высшего оксида вольфрама термодинамически вероятна при температуре, превышающей 1000 °С. В температурном интервале, близком к 1000 °С, термодинамически возможна сублимация ассоциатов триоксида вольфрама ( $W_xO_y$ ). Сублимация  $WO_3$  в молекулярном виде термодинамически вероятна при температуре выше 1600 °С.

Как видно на рис. 5 (кр. 3), вторая производная, минуя вторую экстремальную минимальную точку, когда скорость процесса становится постоянной величиной, меняет знак с положительного на отрицательный. Это свидетельствует о том, что по мере увеличения степени превращения происходит изменение механизма окисления компактного вольфрамокобальтового материала. Скорость окисления в области температур, приближающихся к 900 °С, начинает возрастать.

На рис. 9 показан образец ВК8, полученный в конечной стадии окислительного процесса в интервале температур 900—970 °С при достижении степени окисления массы образца 40%. Происходит разрушение образца и, как следствие, увеличение площади активной реакционной поверхности. Эффект кристаллографического несоответствия начинает проявляться уже при  $\alpha > 7\%$  (рис. 4 и 5). На рис. 7, з видно растрескивание поверхности в результате фазовых преобразований поверхностного слоя образца, то есть перехода металлического вольфрамокобальтового композита в нижние оксиды элементов. На внешней поверхности образца наблюдалось незначительное локальное образование триоксида вольфрама. Однако отсутствие на поверхности триоксида вольфрама (рис. 7, з) при температуре выше 1000 °С свидетельствует о довольно быстром удалении его в сублимационной стадии. Высокая скорость сублимации

Рис. 9. Конечный вид композита, полученного в окислительном процессе в температурном режиме, приведенном на рис. 3.



триоксида вольфрама позволяет освободить реакционную поверхность от блокирующего её высшего оксида при температурах, превышающих 1000 °С.

Таким образом, рассмотрено развитие окислительного процесса компактного образца вольфрамокобальтового сплава ВК8 в среде воздуха. Получены кинетические данные этапов физико-химического взаимодействия композита с кислородом воздушной среды при температурах до 1000 °С. Исследован механизм разрушения компактного образца на начальной и последующих стадиях преобразования при относительно низких температурных интервалах 30—1000 °С.

1. *Войтович Р. Ф.* Высокотемпературное окисление металлов и сплавов / Р. Ф. Войтович, Э. И. Головки. — К. : Наук. думка, 1980. — 295 с.
2. *Зеликман А. Н.* Вольфрам / А. Н. Зеликман, Л. С. Никитина. — М. : Металлургия, 1978. — 272 с.
3. *Батунер Л. М.* Математические методы в химической технике / Л. М. Батунер, М. Е. Позин. — Л. : Госхимиздат, 1960. — С. 441—442.
4. *Зенков В. С.* Анализ физико-химических процессов в редокс-циклах получения водорода при взаимодействии вольфрама и его оксидов с углеродсодержащими окислительными и восстановительными средами / В. С. Зенков, В. В. Пасичный // Современные проблемы физического материаловедения. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2012. — Вып. 21. — С. 147—162.

#### **Аналіз можливості перетворення відходів вольфрамокобальтового композита в середовищі повітря для процесів одержання водню металопаровим методом**

В. С. Зенков, В. В. Пасичний

*Розглянуто розвиток процесу окиснення компактного зразка вольфрамокобальтового сплаву ВК8 в середовищі повітря в умовах застосування поверхневого нагріву в сонячному концентраторі. Отримано кінетичні дані етапів фізико-хімічної взаємодії композита з киснем повітряного середовища при температурах до 1000 °С. Досліджено механізм руйнування компактного зразка на початковій і наступних стадіях перетворення в температурному інтервалі 30—1000 °С.*

**Ключові слова:** вольфрам, окиснення, оксиди, кінетика окиснення, сонячна енергія, термодинамічний аналіз.

#### **Analysis of the possibility of converting tungsten-cobalt composite waste in air for use in the processes of hydrogen obtaining by the metal-vapor method**

V. S. Zenkov, V. V. Pasichny

*We consider the development of the oxidation process a sample tungsten-cobalt of VK8 alloy in air at the solar heating of the surface. Kinetic data of stages physicochemical interaction with the composite and oxygen of ambient air at temperatures up to 1000 °C. Consider the time of the failure mechanism of compact sample in the initial and subsequent stages of the conversion at relatively low temperature ranges of 30—1000 °C.*

**Keywords:** tungsten oxidation, oxidation kinetics, solar energy, thermodynamic analysis.