

Термодинамика и кинетические особенности окисления вольфрамомедного псевдосплава

В. С. Зенков

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН
Украины, Киев, e-mail: vitaliy.zenkov.43@mail.ru

Приведены экспериментальные данные, характеризующие последовательные этапы преобразования вольфрамомедного псевдосплава в окислительной среде. Показано влияние составляющих элементов псевдосплава, размерного фактора, развития реакционной поверхности исследуемых материалов на кинетику окислительных процессов. Представлена зависимость развития поверхности от степени диспергирования. Выявлена необходимость корреляции технологических параметров окислительного процесса с оптимальным диспергированием материала. Информация полезна при разработке технологии регенерации вольфрама из вольфрамсодержащих материалов.

Ключевые слова: псевдосплав, вольфрам, медь, окисление, дисперсность, кинетика окисления, термодинамический анализ.

Разработка методов регенерации элементов сплавов, содержащих дорогостоящие, стратегические металлы, и возвращение их в производство является актуальной задачей для многих отраслей промышленности. При разработке методики могут быть использованы реакции окисления, имеющие большое практическое значение при синтезе, формировании и анализе свойств материала. Развитие окислительного процесса зависит от физических и химических свойств поверхностных оксидных составляющих и от фазовых превращений в реакционном объёме. Эффект разрушения компактного многокомпонентного материала в окислительных процессах с последующим разделением оксидов металлов может использоваться в процессе утилизации. Окисление сплавов металлов с различной энергетической связью элементов в твёрдой фазе, таких как интерметаллиды и растворы, рассмотрено в работе [1]. Классификация видов окисления сплавов базируется в основном на различии условий, в которых может протекать взаимодействие газа-окислителя с твёрдой фазой. Эти условия характеризуются не только основными термодинамическими параметрами, такими как температура и давление газа-окислителя, но и химическими свойствами, сродством элементов твёрдой фазы, их сродством к кислороду, концентрацией элементов в сплаве или псевдосплаве с ограниченной взаимной растворимостью. К материалам с практически нерастворимыми составляющими относится псевдосплав вольфрама и меди, который широко используется в аэрокосмической промышленности, энергетике, электронике, металлургии, машиностроении. Псевдосплав сочетает в себе свойства обоих металлов. Рассматриваемый материал состоит из равномерно размещённых частиц одного металла в матрице другого.

© В. С. Зенков, 2015

С практической и научной точек зрения представлялось интересным рассмотреть физико-химические особенности окислительной стадии регенерации элементов сплава — вольфрама и меди. Особенно важно выявить механизм многостадийного окислительного процесса, включающего данные о влиянии на него последовательных и параллельно протекающих реакций, в которых возможно образование промежуточных соединений, таких как вольфрамат меди [2—5] и ряда оксидов металлов. Формирующиеся в процессе окисления промежуточные соединения могут оказывать лимитирующее влияние на кинетику окислительного процесса в областях их существования. В связи с этим интересно провести экспериментальное исследование кинетики окислительных процессов и анализ термодинамических данных, характеризующих поведение материала в выбранной реакционной системе.

Сродство элементов и их мольное содержание в исследуемой многокомпонентной системе могут оказывать конкурирующее влияние на стадийность, механизм и макрокинетику окислительного процесса.

Для оценки потенциальной реакционной способности элементов использованы приведенные на рис. 1 температурные зависимости констант равновесия K_p реакций взаимодействия индивидуальных составляющих вольфрамомедного псевдосплава с кислородом, реакций твёрдофазного окисления вольфрама при взаимодействии с оксидом одновалентной меди, а также реакций образования из оксидов вольфрамата меди. Как видно на рисунке, наибольшей окислительной способностью обладает вольфрам. Изобарно изотермический потенциал ΔG для реакции окисления $W \rightarrow WO_3$ (кр. 1) изменяется в температурном интервале 0—1000 °С от -184,197 до -124,249 ккал.

Медь, с энергетической точки зрения, менее реакционноспособна в кислородсодержащей среде по сравнению с вольфрамом. В начальный момент взаимодействия меди с кислородом предпочтительно окисление

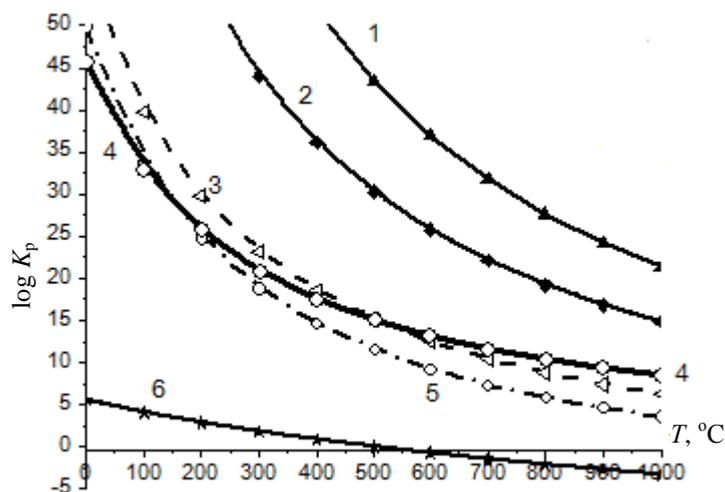


Рис. 1. Зависимость логарифма константы равновесия от температуры реакций окисления: 1 — $W + 1,5O_2 = WO_3$; 2 — $W + O_2 = WO_2$; 3 — $2Cu + 0,5O_2 = Cu_2O$; 4 — $W + 2Cu_2O = WO_2 + 4Cu$; 5 — $Cu + 0,5O_2 = CuO$; 6 — $WO_3 + CuO = CuWO_4$.

до одновалентной меди (рис. 1, кр. 3). Величина изобарно-изотермического потенциала ΔG изменяется в приведенном температурном интервале от $-71,582$ до $-36,393$ ккал. При избытке кислорода (кр. 5) медь окисляется до двухвалентного состояния (ΔG изменяется от $-62,335$ до $-20,838$ ккал). В макросистеме $W-Cu-O_2$ с учетом большого сродства кислорода к вольфраму в сравнении с медью с термодинамической точки зрения допустима передача кислорода от образующихся оксидов меди вольфраму (рис. 1, кр. 3, 4). Температурный интервал относительной стабильности $CuWO_4$ — $0-500$ °C ($\log K_p > 0$ при $T \approx 500$ °C). Приведенные на рис. 1 зависимости позволяют прогнозировать возможность последовательного образования оксидов меди в кислородсодержащей среде до температур, превышающих 1000 °C.

На рис. 2 представлена равновесная диаграмма состояния системы медь—кислород в температурном интервале $500-3000$ °C в зависимости от содержания n компонентов при стехиометрии реакции



Оксидная фаза двухвалентной меди стабильна до температуры 500 °C. При $T > 500$ °C термодинамически вероятна диссоциация оксида меди с образованием активного кислорода и Cu_2O . Полное разрушение твердофазной системы медь—кислород наблюдается при $T > 2500$ °C.

Анализ диаграммы (рис. 2) позволяет получить дополнительную информацию о возможном развитии окислительных процессов псевдосплава, а также уточнить, как влияет медь на развитие преобразования составляющих элементов композита в оксидную систему. В температурном интервале $0-2500$ °C окисление в системе $W-Cu-O_2$ протекает с вероятным образованием вольфрамата меди и соответствующих оксидов элементов:



На рис. 3 представлена равновесная диаграмма состояния рассматриваемой системы.

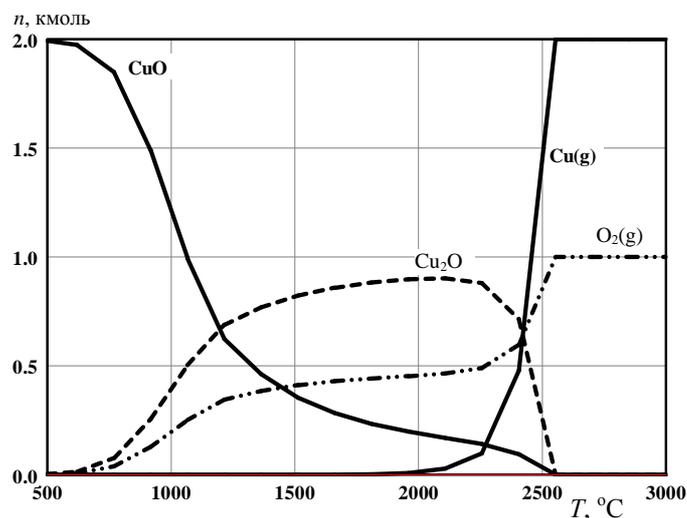


Рис. 2. Диаграмма состояния системы медь—кислород в интервале температур $0-3000$ °C.

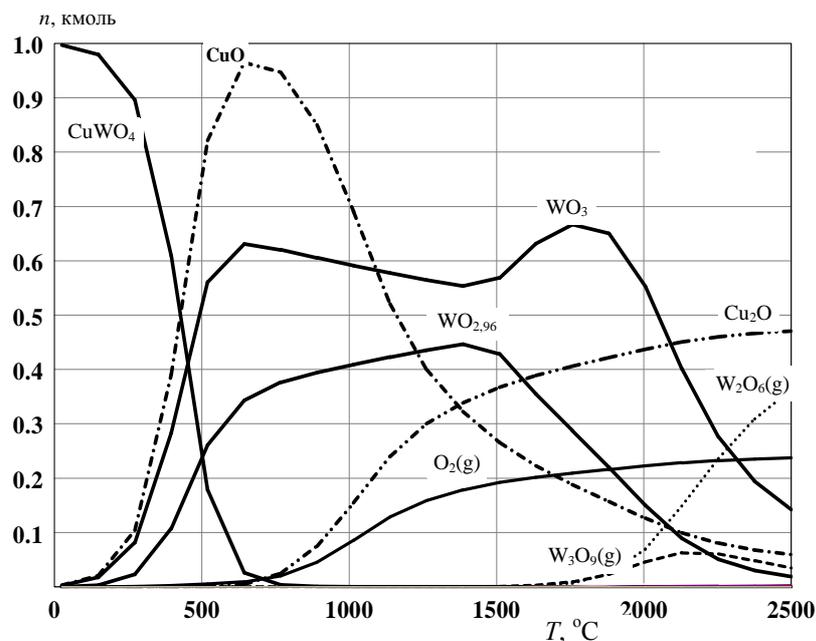


Рис. 3. Равновесная диаграмма состояния системы W—Cu—O₂.

Фаза вольфрамата меди при $T \approx 750$ °C полностью переходит в оксидные фазы составляющих элементов. Равное содержание оксидов и вольфрамата меди наблюдается в интервале температур 450—500 °C. В этом же интервале термодинамически вероятно образование свободного кислорода в результате диссоциации двухвалентного оксида меди. При выбранном соотношении реагентов возможно формирование ряда нестехиометрических оксидов вольфрама. Сублимации оксидов вольфрама при температурах ниже 1000 °C не происходит. Термодинамические данные представляют информацию для прогнозирования и анализа возможных окислительных процессов в кислородсодержащей среде при преобразовании индивидуальных элементов вольфрама и меди, а также вольфрамомедного псевдосплава.

Кинетические исследования взаимодействия в системе твёрдое тело—газ проводили с использованием гравиметрического метода с непрерывной регистрацией изменения массы окисляемого материала. Методика позволяет изучать кинетику гетерогенных процессов системы газ—твёрдое тело в вакууме и при атмосферном давлении как в замкнутой системе, так и в потоке различных газов. Чувствительность измерительной системы составляла $1 \cdot 10^{-4}$ г. Масса навесок испытываемых материалов — 50—100 мг. Процесс окисления осуществляли в изотермическом и неизотермическом режимах. Скорость поднятия температуры — 5 °C/мин.

На рис. 4 приведены зависимости степени окисления от времени различающихся по геометрическим параметрам образцов порошка вольфрама марки ПВТ ($S_{уд} = 0,11$ м²/г, $d = 2,8$ мкм), компактного образца вольфрама толщиной 2,2 мм, фольг меди марки М1 толщиной 0,1 мм, псевдосплава W + 15Cu* толщиной 0,15 мм и псевдосплава W + 8,7Cu диаметром 2 мм.

*Здесь и далее составы сплавов приведены в % (мас.).

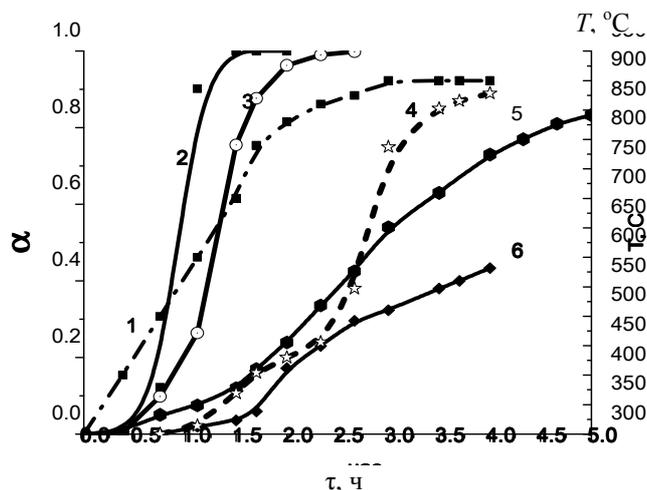


Рис. 4. Зависимость степени окисления в неизотермическом режиме в воздушной среде от времени: 1 — кривая изменения температуры; 2 — порошок вольфрама, $d = 2,8$ мкм; 3 — фольга W + 15Cu толщиной 0,15 мм; 4 — W + 8,7Cu толщиной 2 мм; 5 — фольга Cu толщиной 0,1 мм; 6 — компактный образец вольфрама, $d = 2,2$ мм.

Наиболее активным из испытываемых материалов является порошок вольфрама. В неизотермическом режиме процесс практически заканчивается в течение 1 ч (кр. 2). Достаточно подробно окисление различных образцов вольфрама в воздушной среде и парах воды рассмотрено в работах [5—7].

Порог начала окисления медной фольги проявляется при температуре близкой к 400 °С. По всей вероятности, образующаяся в начальный низкотемпературный период плёнка закиси меди достаточно плотно блокирует поверхность металла от газовой фазы. В неизотермическом режиме при степени окисления, превышающей 0,2 ($T > 550$ °С), наблюдается ускорение окислительного процесса в температурном интервале начала преобразования оксида CuO в Cu₂O с переходом активного кислорода (см. рис. 2) на границе раздела оксид—металл в реакционную зону взаимодействия с металлической медью.

На рис. 4 (кр. 3) представлена зависимость степени окисления псевдосплава вольфрама, содержащего 15% (мас.) меди, от времени и температуры. В псевдосплаве частицы вольфрама плакированы достаточно плотным слоем меди, изолирующим частицы от прямого взаимодействия с окислительной газовой средой. В связи с этим окисление псевдосплава в начальный период должно определяться кинетическими параметрами взаимодействия меди с кислородом. Степень превращения α достигает значения 0,99 за 2,33 ч. Следует отметить, что в начальный период в интервале $\alpha = 0—0,15$ происходит ускорение окислительного процесса фольг псевдосплава (кр. 3) и меди (кр. 5). Это подтверждает предположение о том, что окисление псевдосплава начинается с взаимодействия кислорода воздуха с медью, плакирующей частицы вольфрама. По мере увеличения степени окисления композита скорость процесса увеличивается и приближается к скорости окисления порошка

вольфрама. Это указывает на разблокировку и начало активного окисления частиц вольфрама.

Особое значение при исследовании преобразований в гетерогенной реакционной системе газ—твёрдое тело приобретает размерный фактор образца, от которого зависят параметры окислительного процесса, характеризующиеся кинетической и диффузионной стадиями взаимодействия элементов композита с кислородом. Доля степени превращения, которая приходится на индивидуальную частицу в суммарном процессе окисления, уменьшается по мере увеличения количества частиц — $\alpha/(n_0 + dn_i)$ или суммарной поверхности — $\alpha/(s_0 + dS_i)$.

Этот эффект влияет на скорость окислительных реакций различных образцов (рис. 5). Наблюдается уменьшение реакционной нагрузки на единицу поверхности массы преобразуемого объекта с увеличением его реакционной поверхности. С уменьшением дисперсности или увеличением размеров частиц составляющих элементов исследуемых объектов проявляется лимитирующее влияние диффузионной стадии миграции кислорода в реакционную зону раздела оксидной фазы и металла, то есть скорость окисления зависит от диаметра или толщины испытываемого материала.

В связи с этим необходимо учитывать влияние масштабного фактора на кинетику преобразования материала. Исходя из этого, для оптимизации окислительных процессов желательно контролируемое увеличение реакционной поверхности реагента с использованием механического диспергирования крупногабаритной массы — дробления, прокатки и др.

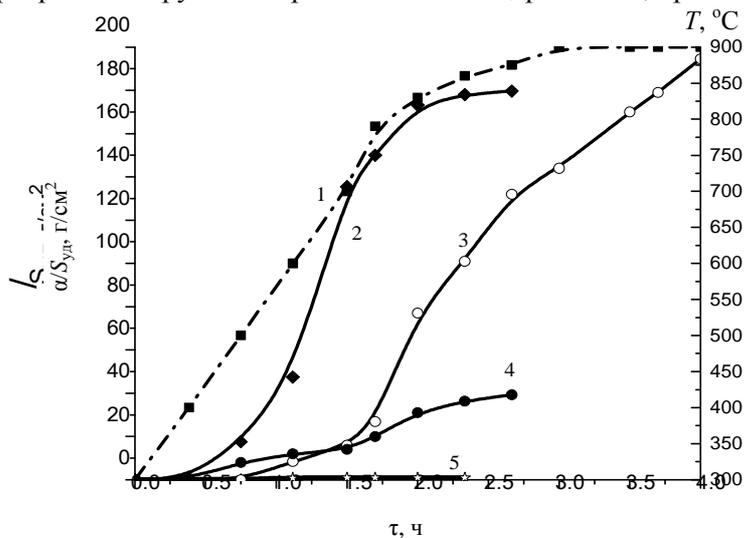


Рис. 5. Зависимость динамической нагрузки на единицу исходной реакционной поверхности от времени в процессе окисления различных материалов: 1 — кривая изменения температуры; 2 — фольга W + 15Cu толщиной 0,15 мм, площадь испытываемого образца $S_{уд} = 5,56 \text{ см}^2/\text{г}$; 3 — компактный образец вольфрама, $d = 2,6 \text{ мм}$, $S = 2,24 \text{ см}^2/\text{г}$; 4 — фольга Cu толщиной 0,1 мм, $S = 12,74 \text{ см}^2/\text{г}$; 5 — порошок вольфрама, площадь окисляемой массы $S = 1100 \text{ см}^2/\text{г}$, диаметр частицы $d = 2,8 \text{ мкм}$.

Развитие поверхности выбранной массы или объёма зависит от количества n составляющих частей перерабатываемого материала. Общий объём диспергированного образца равен сумме объёмов:

$$V = \Sigma V_i = nV_i, \quad (3)$$

где V — общий объём материала; V_i — объём индивидуальной частицы; n — количество частиц.

При $n \rightarrow \infty$ объём индивидуальной частицы стремится к минимуму, предел которого приближается к объёму атома элемента. Развитие поверхности кубического образца или прямоугольного параллелепипеда при делении его на n срезов высотой рёбер $d_i < c_0$ определяют по формуле

$$\Sigma S_i = 4S_0 + 2(c_0/d_i)S_0 = 4S_0 + 2nv/c, \quad (4)$$

где ΣS — суммарная площадь частей разделённого объёма; $4S_0$ — площадь боковых граней; c_0 — исходный размер ребра куба; d_i — высота ребра параллелепипеда, полученного в результате деления исходного куба на составные части; $S_0 = v/c$ — площадь основания, равная площади одной стороне куба; $n = c_0/d_i$ — количество частей, на которое разделён объём.

Заданный параметр диспергирования можно определить из (4) по формуле

$$d_i = 2c_0S_0 / (\Sigma S_i - 4S_0). \quad (5)$$

Развитие поверхности при прокатке материала в виде куба, когда поверхность изменяется по мере уменьшения высоты параллелепипеда, находят по формуле

$$\Sigma S_i = 2S_0 + Sb = 2nV_0/c + 4(c/n)S_0^{1/2} = 2nV_0/c + 4(c/n)(nV_0/c)^{1/2}. \quad (6)$$

Развитие поверхности крупногабаритной шарообразной гранулы диспергируемого материала массой m при уменьшении диаметра составляющих эту массу гранул определяют при использовании формулы

$$S_i = 6mn_i/\rho_{cp}d_0, \quad (7)$$

где S_i — поверхность массы вещества; d_0 — исходный диаметр частицы; n_i — кратность уменьшения диаметра частицы; ρ_{cp} — плотность исследуемого вещества; m — масса гранулы.

Проводя корреляцию экспериментальных кинетических данных с геометрическими размерами окисляемого материала, используя зависимости (4)—(7), определяющие развитие поверхности (рис. 6), можно выбрать метод и степень диспергирования, которые соответствуют оптимальным технологическим параметрам процесса. Как видно на рис. 6, наибольший эффект развития поверхности наблюдается при фракционном гранулировании (диспергировании) материала. Это объясняется уменьшением взаимной блокировки поверхности частиц в единице объёма диспергируемой массы.

На рис. 7 представлена зависимость степени и скорости окисления псевдосплава W—15% (мас.) Cu от времени в изотермическом режиме. Следует отметить, что в интервале температур 550—600 °С наблюдается два этапа развития окисления композита (кр. 2, 3). В начале процесса проявляется лимитирующее влияние меди, которая блокирует частицы вольфрама, с последовательным включением в реакцию частиц вольфрама.

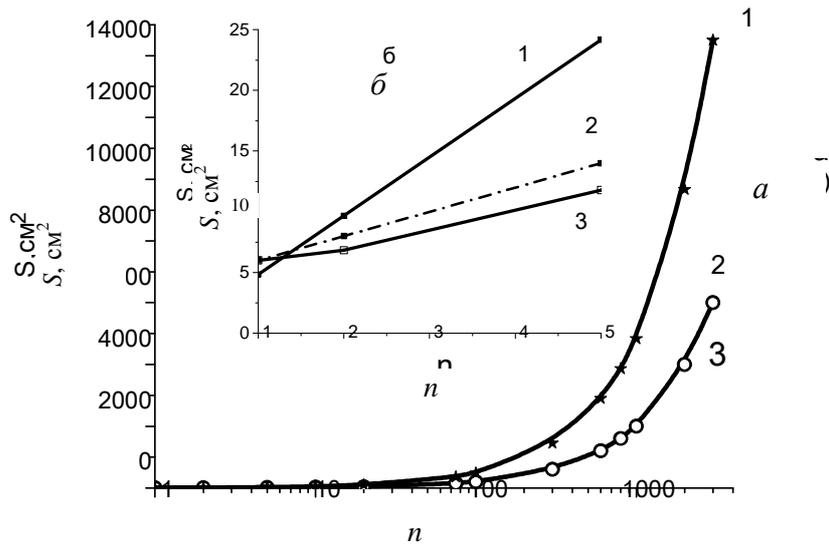


Рис. 6. Зависимость развития поверхности исходного материала объемом 1 см^3 от геометрических параметров составляющих частиц n и метода диспергирования: $a, б$ — масштабирование осей абсцисс; 1 — шарообразное фракционирование при уменьшении диаметра частиц; 2 — деление куба; 3 — прокатка.

Развитие процесса носит сигмоидальный характер. Степень окисления композита при $550 \text{ }^\circ\text{C}$ достигает значения близкого к 0,8 за 4 ч. В начальный период скорость процесса уменьшается от $0,41$ до $0,20 \text{ ч}^{-1}$ (кр. 3а). Минимальное значение экстремума фиксировалось при $\alpha \approx 0,152$. При степени окисления $\alpha \approx 0,295$ скорость начинает возрастать и достигает максимального значения $0,377 \text{ ч}^{-1}$ при $\alpha = 0,467$. Наблюдаются два экстремума развития процесса.

В изотермическом режиме при $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$, в начальный период окисления, также снижается скорость от $0,66$ (кр. 2а) до $0,28 \text{ ч}^{-1}$. Степень

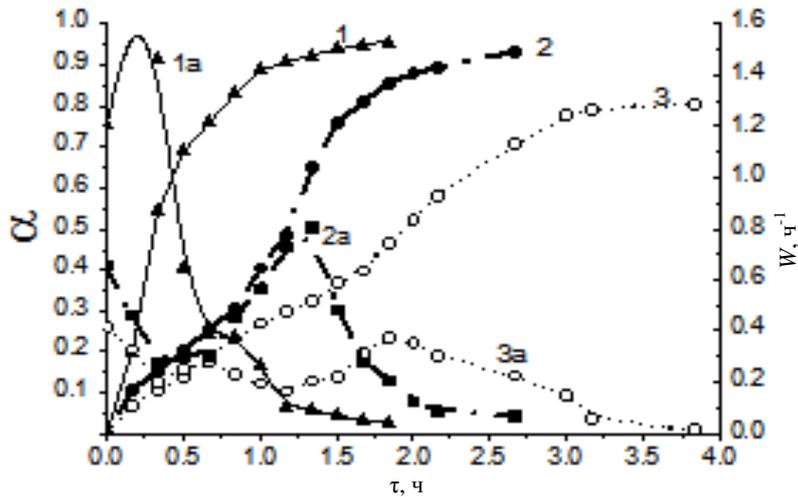


Рис. 7. Зависимость степени (1, 2, 3) и, соответственно, скорости (1а, 2а, 3а) окисления псевдосплава медь—вольфрам от времени в среде воздуха: 1, 1а — $700 \text{ }^\circ\text{C}$; 2, 2а — $600 \text{ }^\circ\text{C}$; 3, 3а — $550 \text{ }^\circ\text{C}$.

окисления при минимальной скорости близка к 0,152, которое соответствует полному окислению медной составляющей композита (доля степени превращения, приходящаяся на окисление меди до CuO, составляет 0,145). Скорость окисления начинает увеличиваться и максимальное значение (0,81 ч⁻¹) наблюдается при $\alpha = 0,649$. Степень окисления $\alpha \leq 1$ достигается за 2,5 ч. Скорости процессов при 550 и 600 °С достигали максимальных значений в области степеней окисления псевдосплава 0,47—0,65.

Развитие процесса окисления композита при 700 °С (рис. 7, кр. 1, 1а) носит иной характер. В начальный кратковременный период, в течение 0,166 ч увеличивается скорость окисления от 0,75 до 1,635 ч⁻¹. При этом степень окисления соответствует завершению стадии взаимодействия кислорода воздуха с плакирующей частицы вольфрама медью, входящей в состав композита. После достижения $\alpha \geq 0,152$ начиналось окисление вольфрамовой составляющей композита, протекающего по параболическому закону.

Полученные кинетические и термодинамические данные дают возможность провести частичный анализ особенностей окисления вольфрамомедного псевдосплава и его составляющих. В начальный момент протекает взаимодействие кислорода с медью, плакирующей частицы вольфрама. На рис. 8 приведены образцы фольги до и после окисления.

Степень блокирования реакционной поверхности оксидной пленкой на границе раздела фаз оксид—металл может характеризовать критерий Пиллинга и Бедворта (Δ) — коэффициент увеличения объема, определяющий отношение объема образующейся фазы к объему исходной [1]. При значении $\Delta < 2$ пленка оксида может довольно плотно блокировать реакционную поверхность окисляемого металла. Для CuO и Cu₂O коэффициент Δ равен 1,73 и 1,51 соответственно. Исходя из значений коэффициента, оксид и в большей степени закись меди могут достаточно плотно изолировать металлическую реакционную поверхность меди от кислорода газовой фазы. Как видно на рис. 8, б, пленка оксидов меди плотно покрывает поверхность металлической меди. Верхняя черная составляющая оксида двухвалентной меди довольно прочно связана в слоистой системе CuO—Cu₂O—Cu.

Медь и её оксиды блокируют частицы вольфрама от непосредственного взаимодействия с кислородом до достижения 500 °С. При $T > 550$ °С (см. рис. 2) проявляется эффект распада оксида меди на закись меди с образованием активного кислорода:

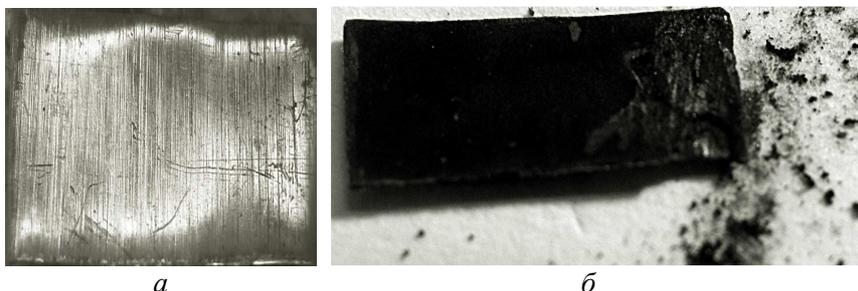


Рис. 8. Вид медной фольги до (а) и после (б) окисления в среде воздуха.

После окисления плакирующего медного покрытия в связи с тем, что сродство кислорода к вольфраму выше, чем к меди, кислород передаётся от оксидов меди к вольфраму. Образующийся в результате реакции (8) активный кислород взаимодействует с вольфрамом на границе раздела фаз:



Это взаимодействие способствует повышению дефектности плакирующего медьсодержащего слоя и, соответственно, увеличению скорости диффузии кислорода к реакционной поверхности окисляемого вольфрама или его низших оксидов. Приведенная реакция процесса наиболее проявляется при температурах 550 и 600 °С (рис. 7, кр. 2а, 3а).

С увеличением степени окисления наблюдается ускорение объёмной деструкции композита [6] и улучшение доступа кислорода к частицам вольфрама. На рис. 9 показан вид исходной фольги псевдосплава до и после воздействия на неё кислорода воздуха. Фольга переходит в порошкообразное состояние.

Разрушение крупногабаритного образца включает несколько стадий преобразования. На рис. 10 представлен компактный образец вольфрама после окислительного процесса в режиме, приведенном на рис. 4 (кр. 5). Компактный образец не разрушается до порошкообразного состояния при достижении усреднённой для окисляемого объёма степени окисления $\alpha \approx 0,4$. Поверхностный слой состоит из нестехиометрических оксидов вольфрама и WO_2 . Триоксидов вольфрама визуально не наблюдалось. Выявленный эффект даёт возможность предположить, что время жизни образующегося поверхностного триоксида вольфрама незначительно.

На рис. 11 приведена диаграмма, которая представляет количественную информацию о мольном содержании кислорода в газовой фазе,

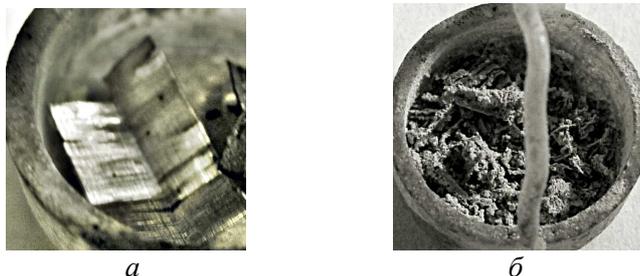


Рис. 9. Вид фольги псевдосплава W + 15% (мас.) Cu до (а) и после (б) окисления в среде воздуха.



Рис. 10. Преобразование компактного образца (а) и проволоки вольфрама диаметром 0,3 мм (б).

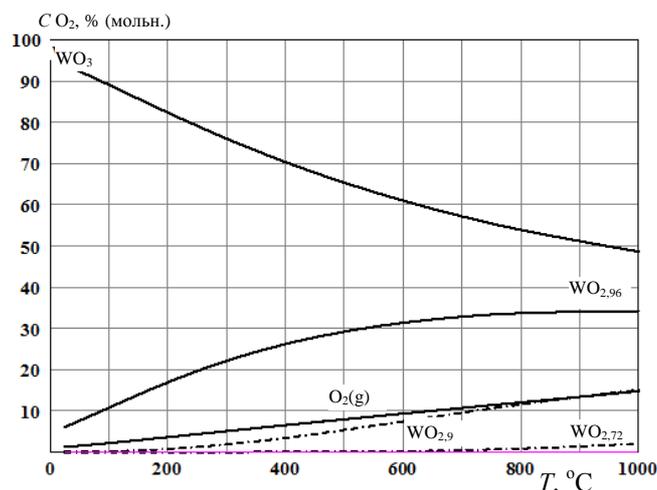


Рис. 11. Диаграмма равновесного количества составляющих системы при термораспаде WO_3 .

образующегося за счёт диссоциации оксида в температурном интервале 0—1000 °С. С повышением температуры происходит интенсификация диссоциации триоксида вольфрама с образованием активного кислорода и нестехиометрических оксидов. В связи с высоким парциальным давлением кислорода над поверхностью триоксид вольфрама выполняет функцию промежуточного транспортного звена передачи кислорода из газовой фазы в реакционную зону взаимодействия с металлом или низшими оксидами.

При окислении компактного образца лимитирующую роль играют диффузионные процессы, от которых зависит временной период разрушения в результате кристаллографического несоответствия образующихся фаз. Это подтверждается экспериментальными данными окисления проволоки вольфрама. Преобразование материала показано на рис. 10, б. Проявляется стадийность окисления по схеме металл → низший оксид → высший оксид, который обладает высокой пористостью и находится на стадии полной потери компактной геометрической формы.

Таким образом, полученные экспериментальные данные характеризуют последовательные этапы преобразования вольфрамомедного псевдосплава в окислительной среде. Проведены сравнительные эксперименты по окислению составляющих псевдосплав материалов — фольги меди, компактного вольфрама и высокодисперсного порошка вольфрама. Показано влияние составляющих элементов псевдосплава, размерного фактора, развития реакционной поверхности исследуемых материалов на кинетику окислительных процессов. Выявлено, что для ускорения окислительного процесса необходимо диспергирование крупногабаритных образцов или механическое снятие поверхностных оксидов с целью освобождения реакционной поверхности.

1. *Бернар Ж.* Окисление металлов. — М. : Металлургия, 1968. — Т. 1. — С. 179.
2. *Пат. 2408536 Украины.* Способ получения вольфраматов или молибдатов двухвалентных металлов / [А. Ю. Волошко, Д. С. Софронов, О. В. Шишкин и др.]. — Оpubл. 27.12. 2009.
3. *Справочник химика / Редкол. : Б. П. Никольский и др.* — Л. : Химия, 1971. — Т. 2. — 1168 с.

4. *CRC Handbook of Chem. and Phys.* 89th edition. — Taylor and Francis Group, LLC, 2008—2009.
5. *Kihlborg, E. Gebert.* CuWO₄, a distorted wolframite-type structure // *Acta Crystallographica Sec. B.* — 1970. — **B26**, No. 7. — P. 1020—1026. — DOI:10.1107/S0567740870003515.
6. *Зенков В. С.* Анализ возможности преобразования отходов вольфрамкобальтового композита в среде воздуха для процессов получения водорода металлопаровым методом / В. С. Зенков, В. В. Пасичный // *Современные проблемы физического материаловедения.* — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2013. — Вып. 22. — С. 56—66.
7. *Зенков В. С.* Исследование кинетики окисления различных по размерам и удельной поверхности частиц металлического вольфрама парами воды в стадии получения водорода / В. С. Зенков, В. В. Пасичный // *Там же.* — 2014. — Вып.23. — С. 132—144.

Термодинаміка і кінетичні особливості окиснення вольфрамомідного псевдосплаву

В. С. Зенков

Наведено експериментальні дані, що характеризують послідовні етапи перетворення вольфрамомідного псевдосплаву в окиснювальному середовищі. Показано вплив складових елементів псевдосплаву, розмірного фактора, розвитку реакційної поверхні досліджуваних матеріалів на кінетику окиснювальних процесів. Представлено залежність розвитку поверхні від ступеня диспергування. Виявлено необхідність кореляції технологічних параметрів окисного процесу з оптимальним диспергуванням матеріалу. Інформація корисна при розробці технології регенерації вольфраму з вольфрамвмісних матеріалів.

Ключові слова: псевдосплав, вольфрам, мідь, окиснення, дисперсність, кінетика окиснення, термодинамічний аналіз.

Thermodynamics and kinetic peculiarities for oxidation of tungsten-copper pseudoalloy

V. S. Zenkov

Experimental data which characterizes the stepwise transformation of tungsten — copper pseudoalloy in an oxidizing environment have been studied. The influence of pseudoalloy constituent elements, a size factor as well as a development of the reaction surface of the tested materials on the kinetics for oxidation processes have been established. Dependence of specific surface area from the degree of dispergation has been presented. Necessity for correlation of the technological parameters of oxidation process has been established. This information is useful for developing technology of regeneration of tungsten from tungsten-containing materials.

Keywords: pseudoalloy, tungsten, copper, oxidation, kinetics, thermodynamic analysis.