



ИССЛЕДОВАНИЕ РЯДА ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ УГЛЕРОДА

Б. А. Мовчан, Ю. А. Курапов, Л. А. Крушинская

Исследованы закономерности испарения и конденсации углерода при электронно-лучевом испарении его через расплав вольфрама, что позволяет существенно повысить скорость испарения углерода. Получены зависимости скорости испарения углерода и содержания примеси вольфрама в конденсате от мощности нагрева и угла падения парового потока.

Regularities of evaporation and condensation of carbon during its electron beam evaporation through a tungsten molten metal, that allows great increasing in carbon evaporation rate, were investigated. Dependencies of carbon evaporation rate and content of tungsten admixture in condensate on heating capacity and angle of vapor flow incidence were obtained.

Ключевые слова: электронно-лучевое испарение; расплав вольфрама; испарение и конденсация углерода; скорость испарения углерода; содержание примеси вольфрама; мощность нагрева; угол падения парового потока

Довольно широкое использование электронно-лучевого испарения и осаждения веществ в вакууме обусловлено в первую очередь высокой производительностью этих процессов [1]. Примером практического применения электронно-лучевой технологии могут быть коррозионно- и жаростойкие, а также теплозащитные покрытия на деталях газотурбинных двигателей.

В последнее время значительно возросло внимание исследователей к конденсированным материалам и покрытиям на основе углерода. Однако способы прямого испарения сопряжены с некоторыми трудностями. При электронно-лучевом нагреве поверхности графита происходит интенсивный выброс мельчайших чешуек, что делает невозможным

получение качественных покрытий [2]. Это обусловлено сублимацией углерода без образования жидкой ванны.

Существенно повысить скорость электронно-лучевого испарения углерода и получить при этом однородный паровой поток данного материала можно путем изменения условий испарения. Это достигается в результате испарения углерода из жидкой фазы, например из расплава. Подобный процесс осуществляют, разместив на испаряемой поверхности графита расплавленную ванну, состоящую из вещества с более низкой, чем у углерода, упругостью пара (например, вольфрама или рения) [2]. В силу разности значений упругости паров из ванны испаряется преимущественно углерод.

Недостатком указанного способа получения углеродсодержащих материалов является присутствие в конденсате небольших количеств тугоплавкого металла. Массовая доля вольфрама в конденсате при испарении углерода через расплав вольфрама может составлять от 2,5 до примерно 10,0 % [2].

Цель настоящей работы заключается в исследовании некоторых закономерностей испарения и конденсации углерода при его электронно-лучевом испарении из ванны жидкого вольфрама.

Эксперименты проводили в электронно-лучевой установке УЭ-150. Внутренний диаметр тигля сос-

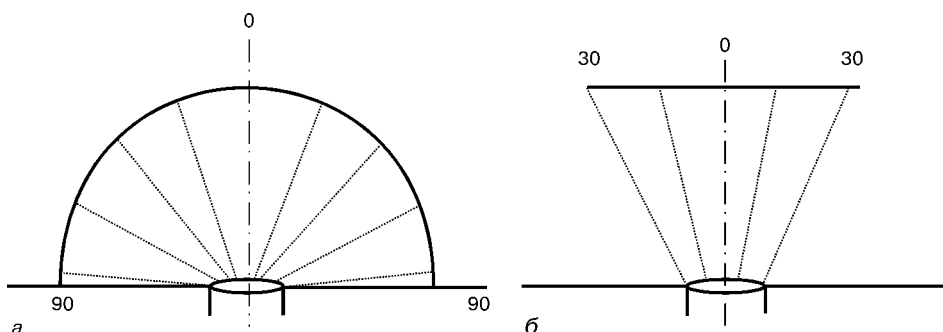


Рис. 1. Схемы электронно-лучевого испарения и конденсации углерода при исследовании парового потока в диапазоне значений угла его падения 180° (а) и 60° (б)



тавлял 50 мм. Расстояние от поверхности расплава до подложек — 250 мм. Вакуум в рабочей камере равнялся $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па. Испаряемый стержень диаметром 48,5 мм и высотой 200 мм изготовили из мелкозернистого графита марки МГ-1. На расходуемый торец графитового стержня помещали шайбу из вольфрама марки ВЧ диаметром 48,5 мм и массой 125 г. Исследовали паровой поток углерода по двум схемам (рис. 1). В качестве подложек по схеме, приведенной на рис. 1, а, использовали стальную полосу шириной 100 мм, изогнутую по радиусу 250 мм, на которой закрепляли вдоль полуокружности дискретные подложки из сетки нержавеющей стали и узкие полоски из жести для сбора конденсата, а по схеме рис. 1, б — пластины из молибдена размером 250×250×1 мм.

Испарение графита проводили при различных значениях мощности электронного луча в диапазоне 27... 42 кВт при фиксированном значении ускоряющего напряжения 24 кВ. По схеме рис. 1, а ток луча равнялся 1,15 и 1,50 А, по схеме рис. 1, б — 1,15; 1,30; 1,50; 1,70 А. Массу навески вольфрама поддерживали постоянной.

На рис. 2 представлена зависимость скорости испарения графита от мощности нагрева ванны расплава вольфрама. Скорость испарения графита определяли исходя из разницы массы графитового стержня до и после испарения, а также длительности процесса. После охлаждения навеска вольфрама легко отделялась от стержня для контроля ее массы.

Исследование зависимости содержания вольфрама в конденсате углерода от мощности нагрева (рис. 1, б) проводили с отбором проб для анализа в диапазоне углов падения парового потока $0, \pm 15$ и $\pm 30^\circ$ (рис. 3).

Общий характер зависимости содержания вольфрама в конденсате углерода от мощности нагрева, представленной на рис. 3, свидетельствует о том, что при малой мощности нагрева расплава (27,6... 31,2 кВт) количество вольфрама в конденсате углерода убывает, а с ее увеличением (31,2... 40,8 кВт) возрастает лишь в центре подложки.

Процесс снижения массовой доли вольфрама в конденсате при малой мощности нагрева связан, по нашему мнению, с увеличением количества углерода в расплаве вольфрама за счет его растворения и доставки на реакционную поверхность конвективными потоками с учетом увеличения объема жидкой ванны вольфрама и площади контакта расплава с твердым углеродом. Повышение мощности нагрева до 31,2 кВт приводит к насыщению

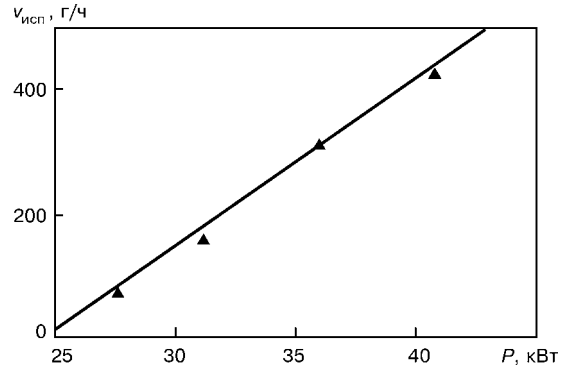


Рис. 2. Зависимость скорости испарения $v_{исп}$ графита от мощности P нагрева ванны расплава вольфрама

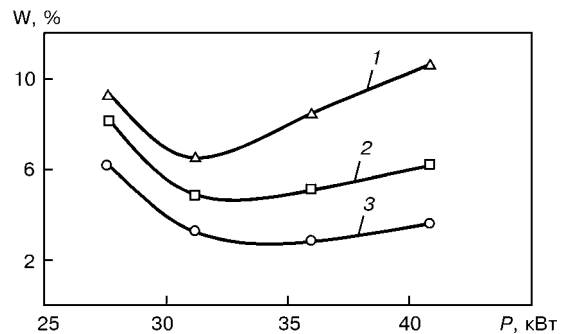


Рис. 3. Зависимость количества вольфрама в конденсате от мощности нагрева при следующих значениях угла падения парового потока, град: 1 — 0; 2 — ± 15 ; 3 — ± 30

расплава углеродом в результате стабилизации размера ванны и установления постоянной площади контакта жидкого вольфрама с твердым углеродом, вследствие чего наступает некоторое равновесное содержание вольфрама в соответствии с диаграммой состояния W-C (2,2... 3,6 %) [2].

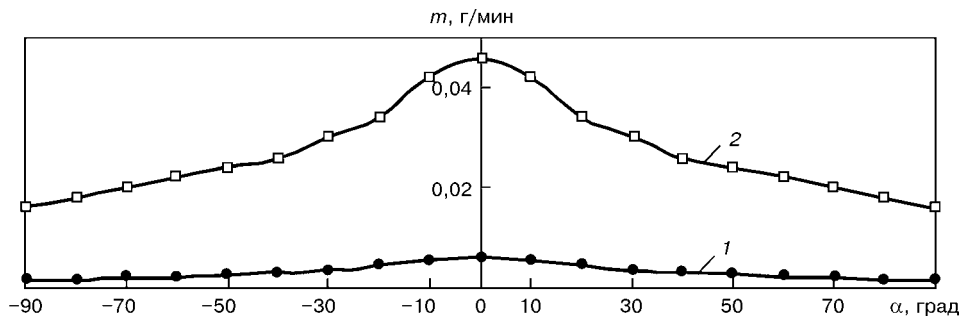


Рис. 4. Скорость конденсации m потока углерода в зависимости от угла его падения α при следующих значениях тока, А: 1 — 1,15; 2 — 1,5

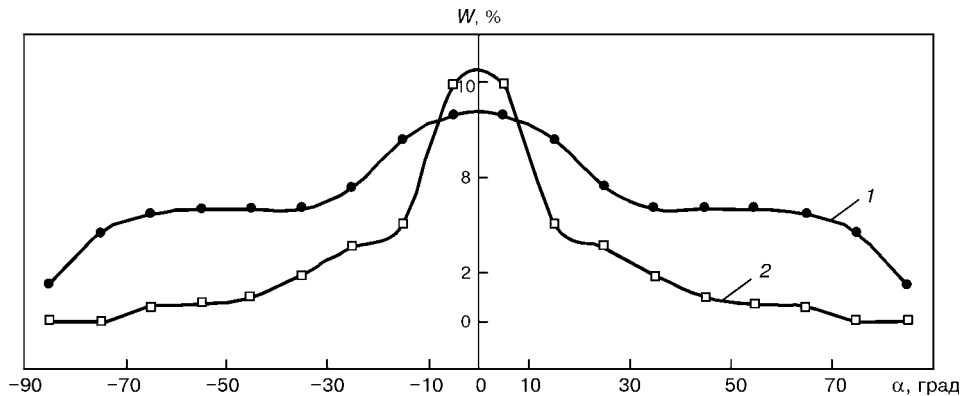


Рис. 5. Содержание вольфрама в конденсате углерода в зависимости от угла падения парового потока при следующих значениях тока, А: 1 — 1,15; 2 — 1,5

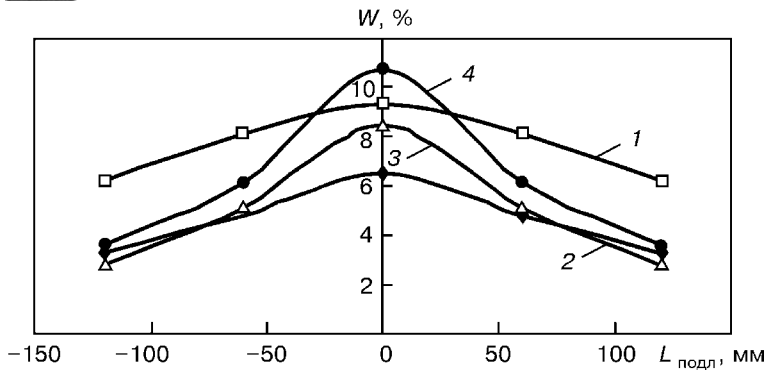


Рис. 6. Зависимость содержания вольфрама в конденсате углерода по поверхности подложки $L_{\text{подл}}$ от мощности нагрева, кВт: 1 – 27,6; 2 – 31,2; 3 – 36,0; 4 – 40,8

С дальнейшим увеличением мощности нагрева до 40,8 кВт процесс уменьшения количества вольфрама в конденсате приостанавливается (рис. 3, периферийные области подложки $\pm 30^\circ$) и возрастает лишь в центре подложки (0°).

Исследование зависимости скорости конденсации углерода и содержания вольфрама в конденсате от угла падения парового потока (рис. 1, а) проводили путем отбора проб для анализа через каждые 10° (рис. 4, 5). Изучение характеристик парового потока показало, что если при токе 1,15 А скорость испарения графита практически постоянна в диапазоне 180° , за исключением незначительного повышения в диапазоне 60° , то при интенсивном режиме (ток 1,5 А) за счет увеличения температуры поверхности расплава скорость испарения углерода плавно возрастает к центру и лишь в диапазоне 60° отмечается ее резкое повышение (рис. 4).

Данные рис. 5 свидетельствуют о влиянии более интенсивного режима испарения, а следовательно, и температуры, на содержание вольфрама в конденсате. Если при равномерной скорости испарения (близкой к лентгмюровской) конденсат содержит практически постоянное количество вольфрама ($\cong 5\%$), кроме незначительного увеличения в центральной области, то в режиме интенсивного испарения, когда с ростом температуры расплава скорость испарения углерода возрастает (рис. 4), количество вольфрама в конденсате углерода на периферии сокращается до нуля, а в центральной зоне значительно увеличивается и локализуется с максимумом в 11%.

Основная масса парового потока осаждается на подложках, расположенных в диапазоне углов $\pm 30^\circ$ и составляет примерно 60% массы общего парового потока (рис. 1, б). Количество вольфрама в конденсате углерода на различных расстояниях от центра подложки ($0, \pm 60, \pm 120$ мм, что соответствует углу падения потока $0, \pm 15$ и $\pm 30^\circ$) при испарении с различной мощностью показано на рис. 6.

При малой мощности нагрева расплава (27,6 кВт) содержание вольфрама на всей поверхности подложки изменяется плавно с небольшой разницей к центру от края (3%). С увеличением мощности нагрева (31,2...40,8 кВт), как и при исследовании по схеме, приведенной на рис. 1, а, в центральной зоне массовая доля вольфрама в конденсате углерода возрастает (максимум 11%). Раз-

ница в количестве вольфрама в центре подложки и на периферии составляет 6...7%.

Повышение температуры поверхности способствует не только увеличению интенсивности испарения, но и смене механизмов испарения и движения пара от поверхности испарения [3]. При слабом испарении молекулы пара свободно удаляются от поверхности, не сталкиваясь между собой. В случае интенсивного испарения вблизи границы раздела фаз возникает слой Кнудсена протяженностью в несколько длин свободного пробега, где происходят первичные столкновения молекул, покидающих поверхность, и начинается формирование парового потока. В результате множества столкновений некоторая часть молекул попадает обратно на поверхность испарения.

Далее, за слоем Кнудсена расположена газодинамическая область, где поток пара движется перпендикулярно поверхности с околосвуковой скоростью. Удаляясь от поверхности, паровой поток начинает расширяться в вакуум, что обусловлено его собственной упругостью. При этом расширение пара происходит не только перпендикулярно поверхности, но и в боковых направлениях, в результате чего формируется струя пара. Боковое расширение парового потока становится существенным на расстояниях от поверхности испарения, равных примерно ее линейному размеру, например, в случае электронно-лучевого испарения диаметру тигля.

Линии тока, по которым движется пар, искривляются, и появляется центробежная сила, действующая на тяжелые молекулы больше, чем на легкие. Это вызывает увеличение скорости диффузии тяжелых молекул к центру струи, что и приводит к разделению компонентов в струе [3–5].

Следует также учитывать, что при интенсивном испарении, вызванном увеличением плотности электронного луча, возрастает давление луча в центре ванны. Изменяется форма поверхности ванны, появляется вогнутость, и паровой поток сужается [6].

Таким образом, данные результаты позволяют оптимизировать технологический процесс испарения и конденсации при получении различных материалов на основе углерода.

1. Мовчан Б. А., Малащенко И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — Киев: Наук. думка, 1983. — 232 с.
2. Чуйков Ю. Б., Мовчан Б. А., Гречаниук Н. И. Некоторые закономерности электронно-лучевого испарения углерода через расплавленную вольфрамовую ванну // Спец. электрометаллургия. — 1987. — № 63. — С. 43–48.
3. Лабунцов Д. А., Крюков А. П. Процессы интенсивного испарения // Теплоэнергетика. — 1977. — № 4. — С. 8–11.
4. Анисимов С. И. Действие излучения большой мощности на металлы. — М.: Наука, 1970. — 272 с.
5. Махоткин А. В., Малащенко И. С., Топал В. И. Процессы разделения при электронно-лучевом испарении сплавов и смесей веществ // Современ. электрометаллургия. — 2005. — № 3. — С. 36–43.
6. Шиллер Э., Гайзиг У. Электронно-лучевая технология. — М.: Энергия, 1980. — 528 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАНУ, Киев

Поступила 26.12.2006