

## ВЗАИМОСВЯЗЬ УСРЕДНЕННОГО И ПАРЦИАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕХОДА ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

*Е.Б. Вотнинова, М.П. Шалимов*

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург*

Описана методика оценки усредненного и парциальных коэффициентов перехода элементов при ручной дуговой сварке.

При сварке покрытыми электродами состав наплавленного металла и его сварочно-технологические свойства зависят от условий плавления стержня и покрытия и взаимодействия образовавшихся фаз друг с другом и газом.

Состав наплавленного металла может быть определен, если известны общие, усредненные коэффициенты перехода элементов. Последние находят чаще всего экспериментально для конкретных условий сварки, что не позволяет гарантировать точность прогноза при изменившихся условиях. В связи с этим была поставлена задача разработки методики определения парциальных коэффициентов перехода элементов, т.е. коэффициентов перехода на каждой стадии нагрева и плавления, и их зависимости от параметров режима сварки.

При плавлении электрода протекают следующие процессы в дуговом промежутке:

- плавление стержня электрода и формирование капель металла;
- плавление металлической части покрытия электрода (ферросплавов) и формирование капель металла;
- плавление неметаллической части покрытия электрода (оксидов, органических соединений) и формирование капель шлака;
- удаление газообразных компонентов из зоны сварки;
- восстановление металлических компонентов из оксидов шлака.

Общий коэффициент перехода элемента показывает, какая доля элемента теряется в процессе сварки. Анализ процессов, протекающих при нагреве и плавлении электрода, позволил найти взаимосвязь общего (усредненного) коэффициента перехода с парциальными коэффициентами, выраженную количественно.

Приведены уравнения, которые позволили на основе экспериментальных и справочных данных найти парциальные коэффициенты перехода элементов.

Эксперимент позволил найти значения масс сварочной и шлаковой ванн при заданных параметрах режима, а также установить зависимость между массами сварочной и шлаковой ванн и мощностью дуги.

Были рассчитаны парциальные и усредненные коэффициенты перехода углерода и марганца в наплавленный металл при ручной дуговой сварке электродами УОНИ 13/55 диаметром 4 мм. В результате обработки экспериментальных и расчетных данных получены регрессионные уравнения для расчета парциальных коэффициентов перехода в зависимости от параметров режима, которые можно использовать для прогнозирования состава наплавленного металла.

*Ключевые слова: ручная дуговая сварка, коэффициент перехода элемента, расчет состава металла шва.*

### **Введение**

При сварке покрытыми электродами формируются капли металла и шлака, определяющие состав наплавленного металла и сварочно-технологические свойства материалов. Состав капель формируется при плавлении стержня и покрытия электрода и взаимодействии образовавшихся фаз друг с другом и газом.

Состав наплавленного металла зависит от общих, усредненных коэффициентов перехода элементов, а последний определяется чаще всего экспериментально для конкретных условий сварки, что не позволяет гарантировать точность прогноза при изменившихся условиях сварки. Была разработана методика определения парциальных

коэффициентов перехода элементов, т.е. коэффициентов перехода на каждой стадии нагрева и плавления, и их зависимости от параметров режима сварки.

### **Описание методики**

Общий коэффициент перехода элемента показывает, какая доля элемента теряется в процессе сварки. При плавлении электрода протекают следующие процессы в дуговом промежутке:

- плавление стержня электрода и формирование капель металла;
- плавление металлической части покрытия электрода (ферросплавов) и формирование капель металла;

– плавление неметаллической части покрытия электрода (оксидов, органических соединений) и формирование капель шлака;

– удаление газообразных компонентов из зоны сварки;

– восстановление металлических компонентов из оксидов шлака.

В соответствии с выделенными процессами, протекающими при плавлении электрода, введем следующие обозначения:

$K_1^{\mathcal{E}_i}$  – доля массы компонента  $\mathcal{E}_i$  металлической части покрытия электрода, окисляемой газом и шлаком;

$K_2^{\mathcal{E}_i}$  – доля массы компонента  $\mathcal{E}_i$  металла стержня, окисляемой газом и шлаком;

$K_3^{\mathcal{E}_i}$  – доля массы оксида компонента  $\mathcal{E}_i$  неметаллической части шихты (покрытия), переходящей в металл в результате реакций восстановления на стадии капли.

Введем уравнения, связывающие величины  $K_1^{\mathcal{E}_i}$ ,  $K_2^{\mathcal{E}_i}$  и  $K_3^{\mathcal{E}_i}$  с парциальными коэффициентами перехода  $\eta_{\mathcal{E}_i}$ :

$$1 - K_1^{\mathcal{E}_i} = \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}}; \tag{1}$$

$$1 - K_2^{\mathcal{E}_i} = \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ф}}; \tag{2}$$

$$K_3^{\mathcal{E}_i} = \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}}; \tag{3}$$

где  $\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}}$ ,  $\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ф}}$ ,  $\eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}}$  – парциальные коэффициенты перехода элемента  $\mathcal{E}_i$  в наплавленный металл из стержня, ферросплавов и шлака соответственно.

В связи с этим можно предположить, что общий (усредненный) коэффициент перехода имеет следующую взаимосвязь с парциальными коэффициентами:

$$\eta_{\mathcal{E}_i} = a \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}} + b \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ф}} + c \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}} = a(1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + b(1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + c K_3^{\mathcal{E}_i}, \tag{4}$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – доли участия электродного стержня, ферросплавов и восстановленного из шлака металла в наплавленном металле;  $\eta_{\mathcal{E}_i}$  – общий, усредненный коэффициент перехода элемента  $\mathcal{E}_i$ .

Определение парциальных коэффициентов перехода заключается в решении системы уравнений с тремя неизвестными (5). Здесь

$m_{\mathcal{E}_i}$  – масса элемента  $\mathcal{E}_i$  в данном объеме металла, кг;

$m_{\text{эл}}$  – масса электрода, кг;

$K_{\text{пот}}$  – коэффициент потерь, учитывающий испарение компонентов и разбрызгивание металла;

$K_{\text{мп}}$  – коэффициент массы покрытия;

$[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}$  – концентрация компонента  $\mathcal{E}_i$  в стержне электрода, мас. %;

%фер $_k$  – концентрация ферросплава  $k$  в покрытии электрода, мас. %;

$[\mathcal{E}_i]_k$  – концентрация компонента  $\mathcal{E}_i$  в ферросплаве  $k$ , мас. %;

% $j$  – концентрация минерала  $j$  в покрытии электрода, мас. %;

$(\mathcal{E}_{in}O_m)$  – концентрация оксида  $\mathcal{E}_{in}O_m$  в минерале  $j$ , мас. %;

$(\mathcal{E}_{in}O_m)_{\text{св}}$  – концентрация оксида  $\mathcal{E}_{in}O_m$  в жидком стекле, мас. %;

$M_{\mathcal{E}_i}$  – атомная масса элемента  $\mathcal{E}_i$ , кг/моль;

$M_{\mathcal{E}_{in}O_m}$  – молекулярная масса оксида  $\mathcal{E}_{in}O_m$ , кг/моль;

$m_{\mathcal{E}_{in}O_m}$  – масса оксида  $\mathcal{E}_{in}O_m$  в шлаке, кг;

$\alpha$  – содержание связующего (жидкого стекла) в покрытии электрода, мас. %;

$\beta$  – массовая доля сухого остатка связующего.

$$\left\{ \begin{aligned} &\eta_{\mathcal{E}_i} = a \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ст}} + b \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ф}} + c \eta_{\mathcal{E}_i}^{\text{ш}} = a(1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + b(1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + c K_3^{\mathcal{E}_i}; \\ &m_{\mathcal{E}_i} = m_{\text{эл}} \frac{1 - K_{\text{пот}}}{1 + K_{\text{мп}}} \times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}}{100} (1 - K_2^{\mathcal{E}_i}) + \frac{K_{\text{мп}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} (1 - K_1^{\mathcal{E}_i}) + \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in}O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in}O_m)_{\text{св}}}{100} \right) \frac{M_{\mathcal{E}_i}}{M_{\mathcal{E}_{in}O_m}} K_3^{\mathcal{E}_i} \right\}; \\ &m_{\mathcal{E}_{in}O_m} = \frac{m_{\text{эл}}(1 - K_{\text{пот}})}{1 + K_{\text{мп}}} \times \left\{ \frac{[\mathcal{E}_i]_{\text{ст}}}{100} \frac{M_{\mathcal{E}_{in}O_m}}{M_{\mathcal{E}_i}} K_2^{\mathcal{E}_i} + \frac{K_{\text{мп}}}{1 + \frac{\alpha\beta}{100}} \left( \sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\mathcal{E}_i]_k}{100} \frac{M_{\mathcal{E}_{in}O_m}}{M_{\mathcal{E}_i}} K_1^{\mathcal{E}_i} + \left( \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in}O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\mathcal{E}_{in}O_m)_{\text{св}}}{100} \right) (1 - K_3^{\mathcal{E}_i}) \right) \right\}. \end{aligned} \right. \tag{5}$$

Массу компонента в металлической или шлаковой ванне определяем следующим образом:

$$m_{\mathcal{E}_i} = \frac{m_{\text{св.ванны}} \cdot [\mathcal{E}_i]_{\text{распл}}}{100}; \quad (6)$$

$$m_{\mathcal{E}_{in}O_m} = \frac{m_{\text{шлак.ванны}} \cdot (\mathcal{E}_{in}O_m)_{\text{распл}}}{100}, \quad (7)$$

где  $m_{\text{св.ванны}}$  – масса сварочной ванны, кг;

$[\mathcal{E}_i]_{\text{распл}}$  – концентрация компонента  $\mathcal{E}_i$  в расплаве (сварочной ванне), мас. %;

$m_{\text{шлак.ванны}}$  – масса шлаковой ванны, кг;

$(\mathcal{E}_{in}O_m)_{\text{распл}}$  – концентрация оксида  $\mathcal{E}_{in}O_m$  в шлаке (шлаковой ванне), мас. %.

Для решения системы уравнений (5) необходимы следующие справочные: коэффициент массы покрытия; концентрация компонента  $\mathcal{E}_i$  в стержне электрода; концентрация ферросплава  $k$  в покрытии электрода; концентрация компонента  $\mathcal{E}_i$  в ферросплаве  $k$ ; концентрация минерала  $j$  в покрытии электрода; концентрация оксида  $\mathcal{E}_{in}O_m$  в минерале  $j$ ; атомная масса элемента  $\mathcal{E}_i$ ; молекулярная масса оксида  $\mathcal{E}_{in}O_m$ ; масса оксида  $\mathcal{E}_{in}O_m$  в шлаке; содержание связующего (жидкого стекла) в покрытии электрода; массовая доля сухого остатка связующего и экспериментальные данные: масса сварочной ванны; концентрация компонента  $\mathcal{E}_i$  в расплаве; коэффициент потерь; масса шлаковой ванны; масса расплавленного электрода; концентрация оксида  $\mathcal{E}_{in}O_m$  в шлаке.

Предварительные эксперименты показали, что изменение масс сварочной и шлаковой ванн при варьировании параметров режима достаточно хорошо коррелирует с мощностью дуги [1].

Проведение эксперимента. Наплавка осуществлялась на сварочном посту, оборудованном источником питания ВД-315 и включенными в схему магнитоэлектрическими измерительными приборами (амперметром и вольтметром).

Образец представлял собой пластину размером 50×200×8 мм из стали Ст3 по ГОСТ 380–94. Образец подвергался зачистке от окалины и про-

чих загрязнений до металлического блеска. Затем осуществлялась наплавка ниточного валика на проход на заданном режиме с целью определения массы израсходованного электрода и массы наплавленного металла и шлака. Во время наплавки проводились измерения мгновенных значений тока и напряжения. После взвешивания на эту же пластину наплавлялся валик в 5 слоев для получения в верхнем слое чистого наплавленного металла, т. е. без влияния основного металла.

Наплавка производилась в нижнем положении на рекомендованных в ТУ режимах. На каждый диаметр электрода режим настраивался трижды: минимальное значение в рекомендованном диапазоне, среднее значение из диапазона и максимальное. Режимы наплавки ниточного и многослойного валиков на одной пластине совпадали.

При проведении расчетов удобнее оперировать данными, пересчитанными на 100 г расплавленного электрода.

Эксперимент позволил найти значения масс сварочной и шлаковой ванн при заданных параметрах режима, а также установить зависимость между массами сварочной и шлаковой ванн и мощностью дуги.

### Заключение

Разработанная методика позволяет оценивать парциальные коэффициенты перехода элементов в зависимости от параметров режима.

**Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, контракт № Н979.42Б.002/14 «Исследование физических и химических процессов в зоне сварки для создания научных основ оптимизации технологий и разработки материалов».**

### Литература

1. *Вотинова, Е.Б. Разработка методики расчета состава металла шва при сварке покрытыми электродами или порошковой проволокой / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Сварка и диагностика. – 2011 – № 5 – С. 31–35.*

**Вотинова Екатерина Борисовна**, старший преподаватель кафедры технологии сварочного производства, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; votinovacat@rambler.ru.

**Шалимов Михаил Петрович**, д-р техн. наук, профессор кафедры технологии сварочного производства, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; votinovacat@rambler.ru.

*Поступила в редакцию 13 января 2015 г.*

## THE RELATIONSHIP OF AVERAGE AND PARTIAL COEFFICIENTS OF ELEMENT TRANSITION IN MANUAL ARC WELDING

**E.B. Votnova**, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Yekaterinburg, Russian Federation, votinovacat@rambler.ru,

**M.P. Shalimov**, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Yekaterinburg, Russian Federation, votinovacat@rambler.ru

In this work the procedure of the estimation of average and partial factors of the conversion of elements in manual arc welding is described.

In welding by coated electrodes the composition of deposited metal and its technological welding properties depend on conditions of rod melting and coating and the interaction of the formed phases with each other and with the gas.

The composition of the deposited metal can be determined, if general, average conversion factors of elements are known. The latter are found most frequently experimentally for specific conditions of welding which does not make it possible to ensure the forecast correctness in changed conditions. In this connection, the task was set to develop the procedure of the determination of partial conversion factors of elements, i.e., conversion factors at each stage of heating and melting, and their dependence on the parameters of welding conditions.

During electrode melting the following processes in the arc gap proceed, such as:

- melting of the electrode rod and the formation of metal drops;
- melting of the metallic part of the electrode coating (ferroalloys) and the formation of metal drops;
- melting of the nonmetallic part of the electrode coating (oxides, organic compounds) and the formation of slag drops;
- removal of gaseous components from the welding zone; – restoration of metallic components from slag oxides.

The common conversion factor of the element shows what element share is lost in the process of welding. The analysis of the processes, which take place during heating and melting of the electrode, enabled to find the interrelation between general (average) conversion factor and partial coefficients which is expressed quantitatively.

Equations are found which allowed on the basis of experimental and reference data to find partial conversion factors of elements.

The experiment made it possible to find the values of welding and slag baths masses with the assigned regime parameters, and also to establish dependence between welding and slag baths masses and the arc power.

Partial and average conversion factors of carbon and manganese into the weld metal in manual arc welding by electrodes UONI 13/55 with a diameter of 4 mm. were calculated.

As a result of data processing regression equations are obtained for the calculation of partial conversion factors depending on the regime parameters, which can be used for predicting the composition of the deposited metal.

*Keywords:* arc welder, coefficient of element transition, calculation of the weld metal composition.

### References

1. Votnova E.B., Shalimov M.P. [Development of Methods of Calculation of the Composition of the Weld Metal When Welding with Coated Electrodes or Flux-Cored Wire]. *Svarka i diagnostika*, 2010, no. 5, pp. 31–35. (in Russ.)

*Received 13 January 2015*

---

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Вотинова, Е.Б. Взаимосвязь усредненного и парциальных коэффициентов перехода элементов при ручной дуговой сварке / Е.Б. Вотинова, М.П. Шалимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 88–91.

### REFERENCE TO ARTICLE

Votnova E.B., Shalimov M.P. The Relationship of Average and Partial Coefficients of Element Transition in Manual Arc Welding. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, vol. 15, no. 1, pp. 88–91. (in Russ.)

---