

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СВАРОЧНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

О. Г. ЛЕВЧЕНКО<sup>1</sup>, О. Н. БЕЗУШКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37.

<sup>2</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

С целью прогнозирования химического состава аэрозолей, образующихся при ручной дуговой сварке, предложена математическая модель конвективного испарения металла с поверхности расплава. Выполнен численный анализ характеристик потока многокомпонентного металлического пара при сварке высоколегированными хромоникелевыми электродами. Определены скорости испарения компонентов сварочных аэрозолей при применении электродов для сварки высоколегированных сталей. Полученная математическая модель дает возможность рассчитывать не только относительную массовую долю токсичного компонента в аэрозоле, как это было возможно до настоящего времени, но и конвективные потоки компонентов сварочных аэрозолей. Библиогр. 12, табл. 2, рис. 4.

*Ключевые слова:* электродуговая сварка, покрытые электроды, сварочные аэрозоли, химический состав, интенсивность испарения, математическое моделирование

Ручная дуговая сварка характеризуется высокими значениями температуры в дуговом промежутке. Значительная часть поверхности металла электродных капель и сварочной ванны находится в кипящем состоянии и выделяет в зону дуги большое количество паров металла, из которых в результате их конденсации и окисления в воздухе рабочей зоны образуются вредные для организма сварщиков аэрозоли.

Цель данной работы — математическое моделирование химического состава сварочных аэрозолей (СА), образующихся при ручной дуговой сварке высоколегированными хромоникелевыми электродами на основе физико-химических свойств компонентов сварочной ванны.

С повышением температуры давление паров различных веществ растет. При достижении значения давления пара, равного атмосферному давлению (101325 Па), вещество кипит [1]. Зависимость давления насыщенного пара  $p_i$  вблизи поверхности расплавленного металла от ее температуры может быть определена с помощью уравнения Клапейрона–Клаузиуса [2]

$$p_n = p_0 \exp \left[ \frac{\lambda}{k} \cdot \left( \frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_n} \right) \right], \quad (1)$$

где  $p_n$  — давление насыщенного пара над поверхностью металла;  $p_0$  — атмосферное давление;  $T_k$  — температура кипения металла (температура, при которой давление насыщенного пара данного металла равно атмосферному);  $T_n$  — температура поверхности,  $\lambda$  — работа выхода атома из расплава,  $k$  — постоянная Больцмана. Данное уравнение

выполняется при условии, что пар подлжит закону идеального газа, а мольный объем жидкости  $V_{ж}$  намного меньше мольного объема пара  $V_n$ .

Построенные графические зависимости давления насыщенного пара отдельных токсичных элементов, входящих в состав сварочных электродов (хрома, марганца, никеля и железа), от температуры поверхности испаряющегося сплава согласно уравнению (1) при  $T_n = 1500 \dots 3300$  К приведены на рис. 1. Анализ приведенных данных показывает, что в процессе сварки открытой дугой в первую очередь наиболее интенсивно будет испаряться марганец, потом хром, железо и никель.

При проведении расчетов использованы значения работы выхода атома  $\lambda$  и температуры кипения  $T_k$ , при которой давление соответствующего

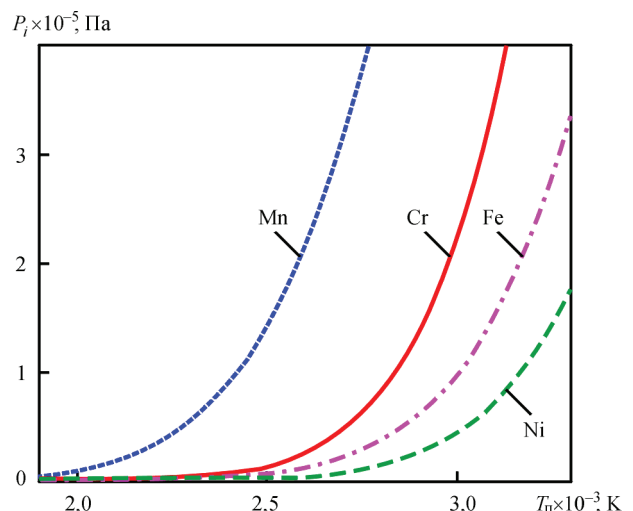


Рис. 1. Зависимость давления насыщенных паров хрома, никеля, марганца и железа от температуры

Таблица 1. Физические свойства компонентов расплавленного металла

Физические свойства	Химический элемент			
	Cr	Mn	Ni	Fe
Работа выхода атома из расплава, $\lambda$ , эрг $\times 10^{-12}$	5,79	3,73	6,31	5,65
Температура кипения металла, $T_{к}$ , К	2840	2424	3173	3008

насыщенного пара элемента равно атмосферному [3, 4] (см. табл. 1).

Оценим результирующее давление насыщенных паров над поверхностью сплава, находящегося в жидком состоянии [5]. Будем считать такой сплав слабым раствором хрома, марганца и никеля в железе. Результирующее давление  $p_{\Pi}$  определим как сумму давлений насыщенного пара над  $i$ -тым компонентом  $p_{i\Pi}$  сплава с учетом активности  $i$ -того компонента в растворе  $\alpha_i$

$$p_{\Pi} = \sum_i \alpha_i p_{i\Pi} \tag{2}$$

Для определения активности железа можно воспользоваться законом Рауля [2, 5]

$$\alpha_{Fe} = X_{Fe}, \tag{3}$$

где  $X_{Fe}$  — мольная (атомарная) доля Fe в соответствующем сплаве. Здесь следует отметить, что закон Рауля практически применим только для слабых растворов, насыщенный пар которых ведет себя как идеальный газ, то есть выполняется тем лучше, чем ниже давление пара.

При определении активности пара растворенных веществ Cr, Mn, Ni будем использовать закон Генри [2, 5]. Представим активности примесей в следующем виде:

$$\alpha_{Cr, Mn, Ni} = \gamma_i X_{Cr, Mn, Ni}, \tag{4}$$

где  $\gamma_i$  — коэффициент активности  $i$ -го элемента;  $X_{Cr, Mn, Ni}$  — мольная (атомарная) доля соответствующего растворенного элемента, то есть его концентрация в сплаве. Из-за отсутствия данных предположим, что все коэффициенты активности равны единице.

Таким образом, учитывая соотношение (3) и предполагая, что  $\alpha_{Cr, Mn, Ni} = X_{Cr, Mn, Ni}$ , с помощью формул (1) и (2) можно оценить давление насыщенного пара над поверхностью сплава, находящегося в расплавленном состоянии, в зависимости от  $T_{\Pi}$ . Мольная доля элемента в расплаве рассчитывается по отношению:

$$X_{ip} = \frac{C_{ip} : M_i}{\sum C_{ip} : M_i}, \tag{5}$$

где  $M_i$  — атомная масса;  $C_{ip}$  — массовая доля  $i$ -того элемента в сплаве.

Исследуем особенности испарения многокомпонентного сплава на примере высоколегирован-

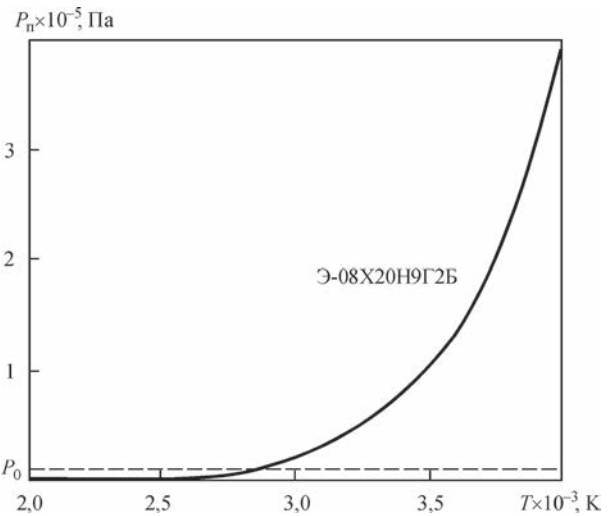


Рис 2. Температурная зависимость давления насыщенного пара над поверхностью расплава металла электродов типа Э-08Х20Н9Г2Б ( $X_{Cr} = 0,213$ ;  $X_{Mn} = 0,02$ ;  $X_{Ni} = 0,085$ ;  $X_{Fe} = 0,683$ )

ных электродов типа Э-08Х20Н9Г2Б (20 % Cr, 2 % Mn, 9 % Ni). Давление многокомпонентного насыщенного пара над расплавом для Cr, Mn, Ni, Fe приведены на рис. 2.

Для определения количественных характеристик процесса испарения (плотности, температуры и скорости оттока пара) воспользуемся моделью Найта [6], основанной на предположении, что поток пара одномерный и стационарный. Данная модель активно применяется для проведения численного анализа тепловых и газодинамических характеристик потока пара при лазерной сварке [6–9]. Информация о применении ее для ручной дуговой сварки отсутствует.

Согласно этой модели, вблизи поверхности испаряемого металла существует кнудсеновский слой толщиной порядка нескольких длин свободного пробега частиц пара, за пределами которого (в газодинамической области течения) устанавливается термодинамическое равновесие. В работе [6–9] были предложены следующие соотношения, связывающие плотность  $\rho_v$  и температуру  $T_v$  пара на границе кнудсеновского слоя с плотностью насыщенного пара  $\rho_{\Pi}$  и температурой испаряющейся поверхности  $T_{\Pi}$

$$\frac{T_v}{T_{\Pi}} = 1 + \frac{m^2 \pi}{32} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{64}{m^2 \pi}} \right), \tag{6}$$

$$\frac{\rho_v}{\rho_{\Pi}} = \sqrt{\frac{T_{\Pi}}{T_v}} \left[ \left( m^2 + \frac{1}{2} \right) e^{m^2} \operatorname{erfc}(m) - \frac{m}{\sqrt{\pi}} \right] + \frac{1}{2} \frac{T_{\Pi}}{T_v} \left( 1 - \sqrt{\pi} m e^{m^2} \operatorname{erfc}(m) \right), \tag{7}$$

где  $\operatorname{erfc}(m)$  — интеграл вероятности. Величина  $m$  рассчитывается по формуле

$$m = \left( \frac{M_v u^2}{2kT_v} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

где  $u$  — среднemasовая скорость оттока с поверхности металла.

Среднemasовую скорость оттока от поверхности металла рассчитывали по формуле

$$u = \frac{s_0 \left( \frac{p_m^0}{p_0} - 1 \right)}{\gamma_0 \sqrt{1 + \frac{\gamma_0 + 1}{2\gamma_0} \left( \frac{p_m^0}{p_0} - 1 \right)}}, \quad (9)$$

где  $p_0$  — атмосферное давление;  $\gamma_0 = 1,4$  — постоянная адиабаты воздуха;  $s_0 = 331,5$  м/с — скорость звука в воздухе;  $p_m^0$  — давление пара на границе кнудсеновского слоя.

Расчет конвективного потока пара осуществлялся по формуле

$$J_{p,i} = \alpha_i \frac{p_{\text{н}}}{p_{\text{н}}} \frac{M_i}{M_v} j_p, \quad (10)$$

где  $p_{\text{н}}$  — результирующее давление рассчитывается по формуле (2);  $p_i$  — давление насыщенного пара над  $i$ -тым компонентом из формулы (1);  $\alpha_i$  — активность  $i$ -того компонента рассчитывается по формулам (3, 4);  $M_v$  — средняя масса атома многокомпонентного пара  $M_v = \sum_{i=1}^n M_i \frac{\alpha_i p_{\text{н}}}{p_{\text{н}}}$ ;  $j_p$  — полный поток испарения  $j_p = \rho_v M_s \approx \rho_v u$ .

Полученные графические зависимости конвективных потоков  $J_i$  хрома, марганца, никеля и железа от температуры поверхности капли приведены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, в диапазоне температур от 2900 до 3400 К наиболее высокий поток испарения характерен для хрома и железа. Для определения интенсивности испарения этих элементов предположим, что площадь испарения капли такая же, как площадь сферы с диаметром равным диа-

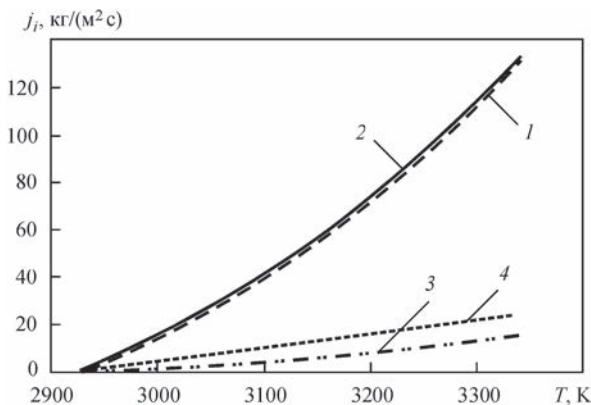


Рис. 3. Зависимости конвективных потоков паров хрома (1), железа (2), марганца (3) и никеля (4) от температуры поверхности капли

Таблица 2. Интенсивность образования компонентов СА при сварке покрытыми электродами типа Э-08Х20Н9Г2Б

Тип электродов — Э-08Х20Н9Г2Б (марка — АНВ-65у)	Интенсивность образования $V_a \times 10^{-5}$ , кг/с			
	CrO <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn	Ni
	0,018337	0,025005	0,020004	0,003334

метру электрода. Диаметр электродов, которыми выполняли экспериментальную сварку, составлял 4 мм. Тогда площадь сферической сварочной капли рассчитывается по формуле  $S_{\text{капли}} = \pi d^2$  и равна  $5,0265 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>.

Поток испарения  $i$ -го элемента запишем в виде

$$J_i = V_i / S_{\text{капли}} \quad (11)$$

Отсюда  $V_i = J_i S_{\text{капли}}$ .

Экспериментальные данные [10] интенсивности образования (выделения) хрома, марганца, никеля и железа при сварке покрытыми электродами типа Э-08Х20Н9Г2Б приведены в табл. 2.

По экспериментальным данным построены диаграммы интенсивности образования компонентов СА.

Как видно из полученных результатов, суммарное значение интенсивности образования соединений хрома преобладает над значениями других вредных компонентов, что подтверждают расчетные данные интенсивности испарения хрома (рис. 4).

Используя предложенную математическую модель, можно прогнозировать интенсивность образования указанных компонентов СА при сварке высоколегированными хромоникелевыми электродами. При этом следует учитывать, что образующийся из капли расплавленного металла пар переносится в сварочную ванну, где частично конденсируется, а остаток рассеивается за пределы дуги, образуя в результате конденсации пара в воздухе аэрозоль. Таким образом, результаты экспериментальных определений количества выделенного СА показывают лишь ту часть пара металла, из которой образуется аэрозоль. Поэтому для уточнения реально прогнозируемого значения интенсивности выделения компонентов СА будем пользоваться коэффициентом соотношения  $K_{vi}$

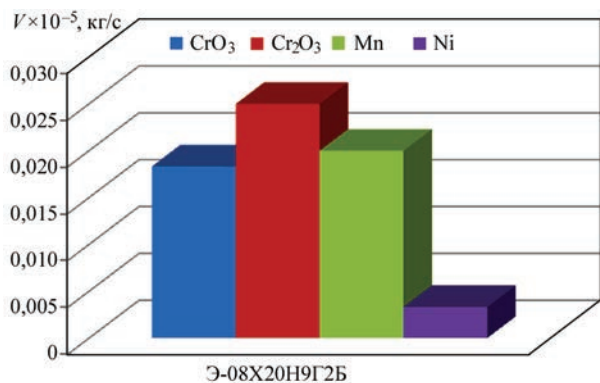


Рис. 4. Интенсивность образования токсичных компонентов СА при сварке электродами типа Э-08Х20Н9Г2Б

экспериментального значения интенсивности выделения  $i$ -того элемента  $V_{i \text{ экс}}$  к его расчетной интенсивности испарения  $V_{i \text{ рас}}$

$$K_{vi} = V_{i \text{ экс}} / V_{i \text{ рас}}$$

Расчетное значение интенсивности испарения  $V_{i \text{ рас}}$  использовали при температуре  $T_{\text{п}} = 3000 \text{ К}$ . Поскольку экспериментальные значения интенсивности испарения хрома представлены для трехвалентного и шестивалентного хрома, просуммируем их для сравнения с расчетными данными. Полученные значения коэффициентов интенсивности испарения  $i$ -того элемента  $K_{vi}$  для хрома, марганца и никеля, соответственно, при сварке электродами типа 08X20H9Г2Б с основным покрытием с раскислением-легированием металла через электродный стержень следующие:  $K_{vCr} = 6,08 \cdot 10^{-4}$ ;  $K_{vMn} = 9,09 \cdot 10^{-4}$ ;  $K_{vNi} = 4,54 \cdot 10^{-4}$ .

Проверка точности математической модели показала, что относительная ошибка соотношений компонентов в составах пара и СА не превышает 30 %, что обусловлено допущениями, принятыми в процессе создания данной системы моделирования.

### Выводы

Таким образом, предложенная математическая модель дает возможность рассчитывать не только относительную массовую долю токсичного компонента в процентах, как это было возможно до настоящего времени [11], но и рассчитывать конвективные потоки компонентов СА, что позволяет без экспериментальных исследований прогнозировать основной гигиенический показатель сварочных материалов — интенсивность образования компонентов СА [12] и на его основе определять степень риска вредного воздействия процесса сварки данными материалами на организм сварщика.

1. Потапов Н. Н. Сварочные материалы для дуговой сварки. Том 1 Защитные газы и сварочные флюсы. Справочное пособие / Н. Н. Потапов. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.
2. Ландау Л. Д. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1976. – Т. V. Статическая физика, Ч.1. – 584 с.
3. Несмеянов А. Н. Давление пара химических элементов / А. Н. Несмеянов. – М.: АН СССР, 1961. – 396 с.
4. Таблицы физических величин: справочник; под ред. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1006 с.
5. Курс физической химии. Т.1.; под ред. Я. И. Герасимова. – М.: Химия, 1969. – 592 с.

6. C. J. Knight // AIAA J., vol. 17, P. 519–523.
7. Моделирование процессов испарения металла и газодинамики металлического пара в парогазовом канале при лазерной сварке / И. В. Кривцун, С. Б. Сухорукое, В. Н. Сидорец [и др.] // Автоматическая сварка. – 2008. – № 10. – С. 19–26.
8. Zhao H. Weld metal composition change during Conduction mode laser welding of aluminum alloy 5182 / H. Zhao, T. Debroy. // Metallurgical and materials transactions B. – 2001. – V 32 B. – P. 163–172.
9. Mundra K. Calculation of weld metal composition change in high-power conduction mode carbon dioxide laser-welded stainless steels / K. Mundra, T. Debroy // Metall. Trans B. – 1993. – 24B. – P. 145–155.
10. Санитарно-гигиенические характеристики покрытых электродов для сварки высоколегированных сталей / К. А. Ющенко, О. Г. Левченко, А. В. Булат [и др.] // Автоматическая сварка. – 2007. – № 12. – С. 44–47.
11. Подгаецкий В. В. О механизме образования сварочного аэрозоля и прогнозировании его состава / В. В. Подгаецкий, А. П. Головатюк, О. Г. Левченко // Автоматическая сварка. – 1989. – № 8. – С. 9–12.
12. ДСТУ ISO 15011-4:2008. Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбирання аерозолів і газів. Ч. 4. Форма для запису даних про аерозолі / [Чинний від 2008-08-15]. – К.: Держспоживстандарт України, 2011. – 20 с.

О. Г. Левченко<sup>1</sup>, О. М. Безушко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».  
03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37.

<sup>2</sup>ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03680, Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗВАРЮВАЛЬНОГО АЕРОЗОЛЮ ПРИ РУЧНОМУ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ВИСОКОЛЕГОВАНИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ

З метою прогнозування хімічного складу аерозолів, що утворюються при ручному дуговому зварюванні, запропонована математична модель конвективного випаровування металу з поверхні розплаву. Виконано чисельний аналіз характеристик потоку багатокомпонентної металевої пари при зварюванні високолегованими хромонікелевими електродами. Визначено швидкості випаровування компонентів зварювальних аерозолів при застосуванні електродів для зварювання високолегованих сталей. Отримана математична модель дає можливість розраховувати не тільки відносну масову частку токсичного компонента в аерозолі, як це було можливо до теперішнього часу, але і конвективні потоки компонентів зварювальних аерозолів. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 4.

*Ключові слова:* електродугове зварювання, покриті електроди, зварювальні аерозолі, хімічний склад, інтенсивність випаровування, математичне моделювання

Поступила в редакцію 17.11.2016