

**К вопросу разработки математической модели  
формирования химического состава литого металла  
шва при автоматической дуговой сварке под слоем флюса**

Магистрант Ф. Андаев

Научный руководитель доц., PhD З.Д. Эрматов

Ташкентский государственный технический университет,  
Узбекистан, г. Ташкент

При автоматической дуговой сварке под слоем флюса формируются капли металла и шлака, определяющие состав литого металла сварного шва и сварочно-технологические свойства материалов, формирование поверхности шва, отделимость шлаковой корки и др. Капли формируются при плавлении сварочной проволоки и плавленого флюса и взаимодействии образовавшихся фаз друг с другом и газом. Процессы взаимодействия фаз, протекающие на различных стадиях нагрева и плавления электродной проволоки, определяют их конечный состав. Учёные ведущих стран мира, такие как Е.О. Патон, И.К. Походня, В.В. Подгаецкий, А.А. Ерохин, Г.Л. Петров и другие исследовали процессы перехода отдельных элементов на основании сравнения исходного состава и состава металла шва [1-4].

Несмотря на достигнутые научные результаты в области создания и разработки состава плавленых флюсов, остается много нерешенных задач: недостаточно изучены модели и методы прогнозирования состава литого металла сварного шва при автоматической дуговой сварке. Для решения данной задачи, проведено исследование, позволившее оценить результаты процессов сварки, протекающих в твердой фазе, капле и металлической ванне, определить усредненные и парциальные коэффициенты перехода элементов. Разработанная физическая модель формирования химического состава литого металла шва, основанная на классификации компонентов покрытия электрода при автоматической дуговой сварке под флюсом была положена в основу создания математической модели:

1. Усредненный коэффициент перехода  $\bar{\eta}_{E_z}$ , понимаемым как доля массы элемента  $E_z$ , остающаяся в наплавленном металле (металле шва):

$$\bar{\eta}_{E_z} = \frac{m_{E_z}^{напл}}{m_{E_z}^{смеш}}, \quad (1)$$

где  $m_{E_z}^{напл}$  - масса элемента  $E_z$  в данном объеме металла после взаимодействия, кг;

$m_{E_z}^{смеш}$  - масса элемента  $E_z$  в металле без учета химических реакций, кг.

2. Общий усредненный коэффициент перехода элемента  $E_z$ :

$$\bar{\eta}_{E_z} = a\eta_{E_z}^{св.пр} + b\eta_{E_z}^{ч.м.} + c\eta_{E_z}^{фер} + d\eta_{E_z}^{шл.мин} + e\eta_{E_z}^{шл.иск.вещ} \quad (2)$$

$$a + b + c + d + e = 1 \quad (3)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  и  $e$  - доли участия сварочной проволоки, ферросплавов, металла, восстановленного из шлака минерального сырья и искусственно получаемых химических веществ, входящих в состав плавленого флюса, в формировании наплавленного металла;

$$\eta_{E_z}^{св.пр} = 1 - k_1^{E_z}, \quad (4)$$

$$\eta_{E_z}^{ч.м.} = 1 - k_2^{E_z}, \quad (5)$$

$$\eta_{E_z}^{фер} = 1 - k_3^{E_z}, \quad (6)$$

$$\eta_{E_z}^{шл.мин} = k_4^{E_z}, \quad (7)$$

$$\eta_{E_z}^{шл.иск.вещ} = k_5^{E_z}, \quad (8)$$

где  $\eta_{E_z}^{св.пр.}$ ,  $\eta_{E_z}^{фер}$ ,  $\eta_{E_z}^{шл.мин}$  и  $\eta_{E_z}^{шл.иск.вещ}$  - парциальные коэффициенты перехода элемента  $E_z$  в наплавленный металл из сварочной проволоки, ферросплавов, шлака, получаемого из минерального сырья и искусственных получаемых химических веществ, входящих в состав плавленного флюса, соответственно.

$k_1^{E_z}$  - доля массы компонента  $E_z$  металла сварочной проволоки, окисленной газом и шлаком;

$k_2^{E_z}$  - доля массы компонента  $E_z$  металлической части плавленного флюса (группа 1. Ферросплавы), окисленной газом и шлаком;

$k_3^{E_z}$  - доля массы оксида компонента  $E_z$  неметаллической части плавленного флюса (группа 2. Минеральное сырье), переходящей в металл в результате реакций восстановления на стадии капли;

$k_4^{E_z}$  - доля массы оксида компонента  $E_z$  неметаллической части плавленного флюса (группа 3. Искусственно получаемые химические вещества), переходящей в металл в результате реакций восстановления на стадии капли.

3. Масса элемента в наплавленном металле

$$m_{E_z}^{напл} = m^{св.пр.} \cdot \frac{E_z^{св.пр.}}{100} + \sum_{k=1}^l m_k^{фер} \cdot \frac{E_z^{фер}}{100} + \sum_{k=1}^p m_k^{шл.мин} \cdot \frac{E_z^{шл.мин}}{100} + \sum_{k=1}^s m_k^{шл.иск.вещ} \cdot \frac{E_z^{шл.иск.вещ}}{100} = m_{E_z}^{св.пр.} + m_{E_z}^{фер} + m_{E_z}^{шл.мин} + m_{E_z}^{шл.иск.вещ}, \quad (9)$$

где  $m_{E_z}^{св.пр.}$ ,  $m_{E_z}^{фер}$ ,  $m_{E_z}^{шл}$  массы элемента  $E_z$  в сварочной проволоке, ферросплавах и восстановленная из неметаллических компонентов, вводимых в состав плавленного флюса, соответственно.

4. Усредненный коэффициент перехода элемента  $E_z$ ,

$$\bar{\eta}_{E_z} = \frac{[E_z]_{н.м.}}{a[E_z]_{св.пр.} + b[E_z]_{фер.} + c[E_z]_{шл.мин} + d[E_z]_{шл.иск.вещ.}} \quad (10)$$

где  $[E_z]_{н.м.}$  - концентрация элемента  $E_z$  в наплавленном металле по результатам химического анализа, мас.%;

$[E_z]_{стер}$  - исходная концентрация элемента  $E_z$  в сварочной проволоке, мас.%;

$[E_z]_{фер}$  - исходная концентрация элемента  $E_z$  ферросплава, вводимого в состав плавленного флюса, мас.%;

$[E_z]_{шл.мин}$  - концентрации элемента  $E_z$  при полном восстановлении оксида элемента  $E_zO_m$  из минеральных веществ шлака, мас.%;

$[E_z]_{иск.вещ.}$  - исходная концентрация элемента  $E_z$  в химически чистых веществах, вводимых в состав плавленного флюса, мас.%;

5. Масса компонента в сварочной ванне:

$$m_{E_z} = \frac{m_{св.ванны} \cdot [E_z]_{распл}}{100} \quad (11)$$

где  $m_{св.ванны}$  - масса сварочной ванны, кг;  $[E_z]_{распл}$  - концентрация компонента  $E_z$  в сварочной ванне, мас.%;

6. Коэффициент потерь металла при автоматической дуговой сварке под слоем флюса:

$$k_{пот}^{Me} = \frac{m_{св.пр.} + m_{фер} + m_{ме}^{шл.мин} + m_{ме}^{шл.иск.вещ} - m_{напл,ме}}{m_{стер} + m_{фер} + m_{ме}^{шл.мин} + m_{ме}^{шл.иск.вещ}} \quad (12)$$

где  $m_{ме}^{шл.мин}$  - масса металла, восстановленного из шлака и перешедшего в сварочную ванну, кг.

7. Коэффициент потерь шлака при автоматической дуговой сварке под слоем флюса:

$$k_{ном}^{шл} = \frac{m_{шл} - m_{шл}^{эксп}}{m_{шл}} \quad (13)$$

где  $m_{шл}$  - масса шлака, образовавшегося при плавении, полученная расчетным путем, кг;

$m_{шл}^{эксп}$  - масса шлака, образовавшегося при плавении, полученная из эксперимента, кг.

$$m_{шл} = m_{пок} - m_{фер} - m_{газ} + m_{окс}, \quad (14)$$

где  $m_{пок}$  - масса покрытия, кг;

$m_{фер}$  - масса ферросплавов в составе плавящего флюса, кг;

$m_{газ}$  - масса газообразных продуктов, образовавшихся при диссоциации и испарении компонентов покрытия электрода, кг;

$m_{окс}$  - масса оксидов, образовавшихся при окислении компонентов сварочной проволоки и ферросплавов в составе плавящего флюса, кг.

8. Формирование состава металла шва:

$$[E_z]_{св.шов} = [E_z]_{осн.ме} \cdot \gamma_{осн.ме} \cdot \eta_{E_z}^{осн.ме} + [E_z]_{нап.ме} \cdot \gamma_{нап.ме} \quad (15)$$

где  $[E_z]_{св.шов}$  - концентрации элемента  $E_z$  в металле шва при однослойной наплавке по результатам химического анализа, мас.%;  $[E_z]_{осн.ме}$  - концентрации элемента  $E_z$  в основном металле по результатам химического анализа, мас.%;  $[E_z]_{нап.ме}$  - концентрации элемента  $E_z$  в наплавленном металле по результатам химического анализа, мас.%;  $\gamma_{осн.ме}$  - доля участия основного металла в металле шва;  $\gamma_{нап.ме}$  - доля участия наплавленного металла в металле шва, при этом;  $\eta_{E_z}^{осн.ме}$  - парциальный коэффициент перехода элемента  $E_z$  из основного металла в металл шва.

9. Парциальный коэффициент перехода элемента  $E_z$  из основного металла в металл шва:

$$\eta_{E_z}^{осн.ме} = \frac{[E_z]_{св.шов} - [E_z]_{нап.ме} \cdot \gamma_{нап.ме}}{[E_z]_{осн.ме} \cdot \gamma_{осн.ме}} \quad (16)$$

Разработана математическая модель процесса формирования литой структуры металла шва при автоматической дуговой сварке на основе классификационной схемы компонентов, входящих в состав сварочных плавящих флюсов. Установлено, что сравнительные расчетные данные математической модели согласуются с экспериментальными данными с незначительными расхождениями – 5%.

### Литература

1. Наумов С.В., Игнатова А.М., Игнатов М.Н. Опыт использования минерального сырья Пермского края в производстве сварочных материалов. – Сб. тр. МНТК «Современные проблемы машиностроения». –Томск: НИ ТПУ. –2010. –С. 372–377.
2. Наумов С.В., Игнатова А.М., Игнатов М.Н. Проект разработки технологии производства плавящих сварочных флюсов на базе камнелитейного производства – Сб. науч. тр. I междунар. науч.-практ. интернет-конф. «Инновационные технологии: теория, инструменты, практика (INNOTECH 2009)». –Пермь: ПГТУ. –2010. –С. 73-79
3. С.В. Наумов, А.Е. Канина, А.М. Игнатова, М.Н. Игнатов. О фракционном составе сварочных флюсов// Научно-технический вестник Поволжья. –2013. –№ 2. –С. 166-169
4. Подгаецкий В.В., Кузьменко В.Г. Сварочные шлаки. Справочное пособие. –Киев, 1988. –253 с