



ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ШЛАКОВ СОЛЕОКСИДНОЙ СИСТЕМЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ СВАРОЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ САМОЗАЩИТНОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ

В. Н. ШЛЕПАКОВ, д-р техн. наук, С. М. НАУМЕЙКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Исследована зависимость поверхностного натяжения шлака солеоксидной системы $BaF_2-LiF-MgO$ от его состава и от температуры. Рассмотрено влияние поверхностного натяжения на сварочно-технологические свойства порошковых проволок при сварке в различных пространственных положениях.

Ключевые слова: дуговая сварка, порошковая проволока, сварочные шлаки, солеоксидные системы, поверхностное натяжение, сварочно-технологические свойства, кроющая способность, подрезы

Создание новых сварочных материалов для дуговой сварки с требуемыми технологическими свойствами является актуальной научной проблемой сварочного производства. Представления о взаимосвязи условий получения качественных сварных соединений с основными физико-химическими свойствами шлаков отображены в ряде публикаций [1, 2]. В них отмечено влияние поверхностного натяжения шлаковой и металлической фаз на сварочно-технологические свойства сварочных материалов в случае дуговой сварки плавлением, в частности на кроющую способность шлака. При низкой кроющей способности шлак не покрывает шов полностью, что ухудшает его вид, формирование шва и отделимость шлака. На плавность перехода к основному металлу и благоприятную форму шва также влияют поверхностное натяжение жидкого металла, режимы и технология сварки. В значительной степени от поверхностного натяжения шлаковой и металлической фаз зависит формирование шва в вертикальном и потолочном положениях.

Межфазным натяжением определяются особенности протекания металлургических реакций, стабильность и скорость удаления неметаллических включений из жидкого металла, адгезия шлака и металла. Межфазное натяжение характеризует энергию взаимодействия атомов железа с ионами шлака, которое оказывает определенное влияние на прочность сцепления шлака с металлом, а следовательно, отделимость шлаковой корки. На химическое сцепление шлака и металла большое влияние оказывают поверхностное и межфазное натяжения на границе раздела металл-шлак, от которых зависит смачивание металла жидкими шлаками. С увеличением значения межфазного натяжения смачивание металла шлаком ухудшается, сила сцепления (адгезия) при этом уменьшается. Чем ближе по своей молекулярной природе расплав и

поверхность металла, тем меньше межфазное натяжение на границе расплав-металл и больше адгезия.

Межфазное натяжение характеризуется уравнением

$$\sigma_{Me-ш} = \sigma_{Me} + \sigma_{ш} \cos \theta, \quad (1)$$

где $\sigma_{Me-ш}$ — межфазное натяжение жидкого шлака на границе с металлом шва; σ_{Me} , $\sigma_{ш}$ — поверхностное натяжение соответственно жидкого металла и жидкого шлака; θ — угол смачивания.

На основании второго закона термодинамики самопроизвольное протекание процесса смачивания твердой поверхности металла шлаком возможно в том случае, если соблюдается условие

$$\sigma_{Me} \geq \sigma_{Me-ш} + \sigma_{ш}, \quad (2)$$

т. е. растекание сопровождается уменьшением свободной энергии системы. Из этого выражения следует, что шлак тем лучше смачивает поверхность металла шва, чем меньше поверхностное натяжение шлака и межфазное поверхностное натяжение металл-шлак и больше поверхностное натяжение металла. Таким образом, исходя из поверхностного натяжения шлака и металла шва можно оценивать смачиваемость, а значит и кроющую способность шлака.

Поверхностное натяжение металлургических и сварочных шлаков было исследовано многими учеными [3–6]. Экспериментальные данные о поверхностном натяжении расплавленного шлака ограничены определенными системами, поэтому зачастую на практике при выборе шлаков не учитываются изменения ряда свойств сварочных материалов. Расчетные методы оценки поверхностного натяжения шлаков [5–8] дают возможность получения информации на базе ограниченного экспериментального материала.

Для оценки поверхностного натяжения расплавленного сварочного шлака использована методика приближенного расчета поверхностного натяжения многокомпонентных растворов, разработанная в [7, 8]. Согласно модельно-термодинами-

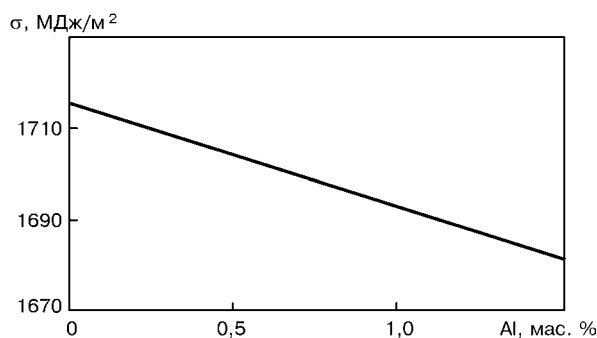


Рис. 1. Зависимость поверхностного натяжения металла (массовая доля элементов в металле составляет, %: С 0,07; Si 0,10; Mn 1,0; Ni 1,0; S 0,005; P 0,01; N 0,02; O 0,02) от содержания алюминия при температуре 1823 К

ческому уравнению поверхностное натяжение σ равно

$$\sigma = \sigma_i - \frac{RT}{\omega} \ln \sum_{i=1}^k F_i N_i, \quad (3)$$

где σ_i — поверхностное натяжение чистого i -го компонента; R — газовая постоянная; ω — молярная поверхность (площадь, занимаемая одним молекул раствора); F_i — поверхностная активность i -го компонента в глубине раствора; N_i — молярная доля i -го компонента.

Поскольку молярная поверхность расплава шлака солеоксидной системы изменяется мало, то для широкого диапазона концентраций компонентов солеоксидных расплавов можно принять молярную поверхность приблизительно постоянной. Значение $\omega = 3,3 \cdot 10^8 \text{ см}^2$ хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными после измерения поверхностного натяжения шлака [9]. Шлаковую основу самозащитных порошковых проволок трубчатой конструкции составляют солеоксидные системы на основе фторидов бария, лития, калия и оксидов магния, алюминия и циркония.

При определении поверхностного натяжения [2, 3] расплавов шлаков солеоксидных систем выведены следующие значения констант F_i : $F_{\text{MgO}} = 1,5$;

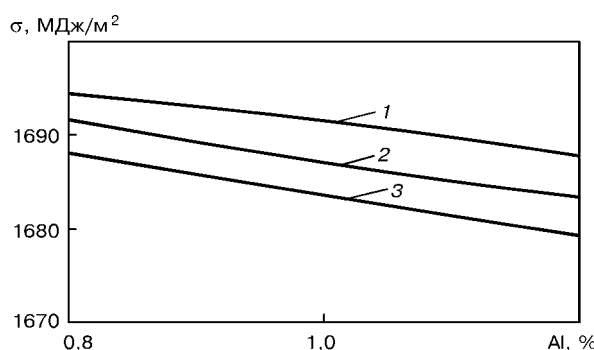


Рис. 2. Зависимость поверхностного натяжения металла (массовая доля элементов в металле составляет, %: С 0,1; Si 0,3; S 0,02; P 0,02; N 0,02; O 0,02) от содержания алюминия и марганца при температуре 1823 К: 1 — 0,5 Mn; 2 — 1,0 Mn; 3 — 1,5 Mn

$F_{\text{LiF}} = 3,2$; $F_{\text{BaF}_2} = 2,9$; $F_{\text{ZrO}_2} = 2,1$; $F_{\text{KF}} = 3,4$; $F_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 3,4$.

Уравнение (1) выведено для оксидов и фторидов соответственно типа MeO , MeF . Чтобы применить к оксидам и фторидам типа Me_xO_y и Me_xF_y , необходимо вместо молярных долей N_i подставить концентрацию N'_i , характеризующую равные количества грамм-ионных долей кислорода в различных оксидах [10], согласно уравнению

$$N'_i = \frac{\gamma_i N_i}{\sum_i \gamma_i N_i}, \quad (4)$$

где γ_i — количество атомов кислорода в молекуле оксида.

Свойства шлаковой и металлической фазы наиболее существенно влияют на геометрию шва при температуре 1700... 1400 °С. Для самозащитных порошковых проволок со шлаками солеоксидной системы характерно использование раскисления и легирования алюминием, марганцем, никелем при невысоком содержании кремния. В случае многокомпонентной шлаковой системы Fe-Ni-Mn-Si-Al при 1823 К поверхностное натяжение может быть описано уравнением [10]:

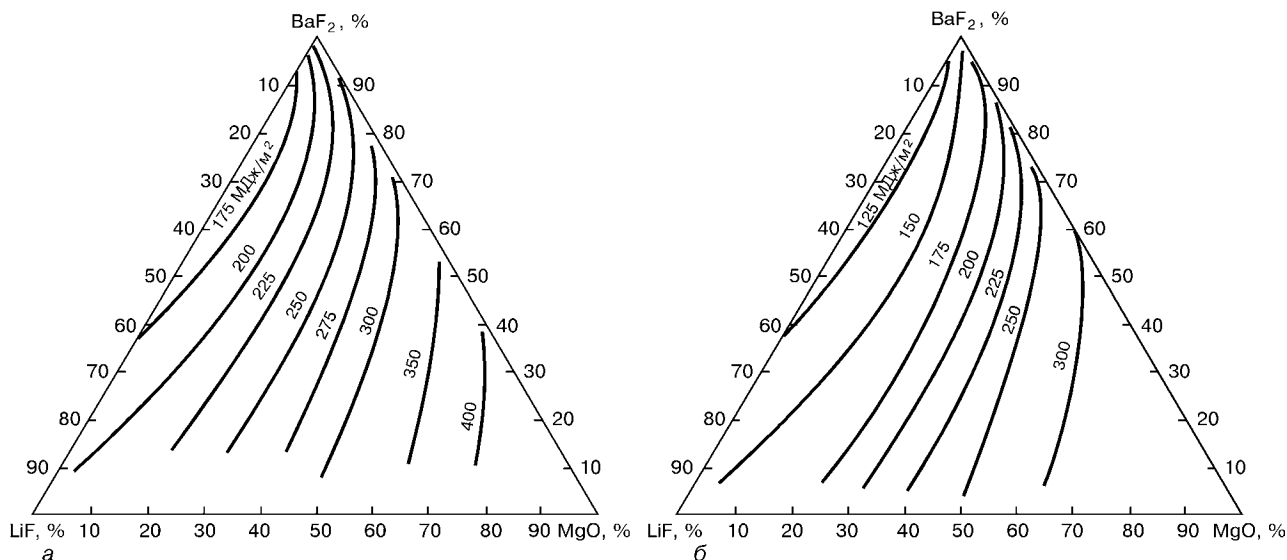


Рис. 3. Зависимость поверхностного натяжения шлака солеоксидной системы BaF_2 -LiF-MgO от их состава при температуре 1673 (а) и 1873 (б) К



Поверхностное натяжение шлаков при температуре 1673 К

| № проволочки | Массовое содержание компонентов в шлаке, % | | | | | | σ , МДж/м ² |
|--------------|--|-----|-----|------------------|-----|--------------------------------|-------------------------------|
| | BaF ₂ | LiF | MgO | ZrO ₂ | KF | Al ₂ O ₃ | |
| 1 | 61 | 15 | 15 | 3,0 | 3,5 | — | 213 |
| 2 | 57 | 14 | 16 | 6,4 | 3,2 | — | 223 |
| 3 | 55 | 13 | 25 | 3,0 | 1,5 | — | 253 |
| 4 | 50 | 15 | 27 | 3,5 | 1,0 | — | 263 |
| 5 | 50 | 13 | 30 | 4,0 | 1,0 | — | 271 |
| 6 | 40 | 10 | 45 | 3,0 | 1,0 | — | 325 |
| 7 | 45 | 5 | 40 | 1,0 | — | 9 | 345 |
| 8 | 35 | 4 | 55 | 1,0 | — | 5 | 385 |

$$\sigma = 1735x_{Si} + 720x_{Si} - 630(x_{Fe} + x_{Mn})x_{Si} + 1700x_{Fe} + 1030x_{Ni} + 800x_{Al} - 200x_{Fe}x_{Al} \quad (5)$$

где x_i — содержание i -го компонента, мол. %.

Уравнение (5) не учитывает влияния растворенных серы, азота и кислорода, но позволяет оценивать изменение поверхностного натяжения жидкого металла при малых колебаниях в содержании указанных примесей.

Расчеты показали, что наибольшее влияние на поверхностное натяжение оказывают алюминий и марганец (рис. 1, 2).

В процессе экспериментальной сварки опытными проволоками на вертикальной плоскости стало очевидным качественное совпадение такого влияния, а именно, при содержании 1,6 % Al происходит стекание металла. При этом металл имеет низкое (приблизительно 1670 МДж/м²) поверхностное натяжение. При содержании в металле около 0,9...1,1 % Al и 1,0...1,2 % Mn (поверхностное натяжение 1690...1695 МДж/м²) в случае сварки в вертикальном положении наблюдается хорошее формирование сварного шва. Для оценки влияния поверхностного натяжения жидкого металла на сварочно-технологические свойства порошковой проволоки принято легирование марганцем и алюминием в установленных пределах.

Кривые изменения поверхностного натяжения шлака солеоксидной системы BaF₂-LiF-MgO при температуре 1673 и 1873 К, рассчитанные по формуле (3), показаны на рис. 3. Для шлаков всех составов поверхностное натяжение снижается с увеличением температуры, что свидетельствует об уменьшении межчастичного взаимодействия, и монотонно возрастает с увеличением концентрации MgO в расплаве. Отсутствие максимумов и минимумов на изолиниях поверхностного натяжения указывает на отсутствие комплексных ионов. Поэтому шлаковая система BaF₂-LiF-MgO представляет собой твердый раствор во всем поле кристаллизации (рис. 3). То, что поверхностное натяжение не зависит от температуры, свидетельствует об отсутствии структурных изменений в указанной шлаковой системе при кристаллизации.

Составы шлаков, образующихся при плавлении опытных самозащитных порошковых проволок, и их поверхностное натяжение при температуре 1673 К приведены в таблице.

Поверхностное натяжение сварочных шлаков существенно влияет на их кроющую способность.

В значительной степени от него зависят качественное формирование сварного шва, а также его формирование при сварке в вертикальном и потолочном положениях. В таком случае желательно, чтобы шлак имел высокое поверхностное натяжение для удержания сварочной ванны, однако при этом кроющая способность шлака ухудшается. Для увеличения последней необходимо, чтобы поверхностное натяжение шлака имело низкие значения. Однако следует учитывать, что при очень низком поверхностном натяжении шлак стекает к краям шва. Экспериментальную проверку влияния поверхностного натяжения шлаков на сварочно-технологические свойства проводили с использованием опытных проволок, основной состав шлаков которых приведен в таблице. У проволок № 1–5 шлаки имеют низкое поверхностное натяжение. При сварке этими проволоками наблюдается растекание шлака по поверхности шва. При очень низком (около 250 МДж/м²) поверхностном натяжении происходит оплавление сварочной кромки с образованием подрезов. Так, при сварки опытными проволоками № 1 и 2, шлаки которых имеют поверхностное натяжение соответственно 213 и 223 МДж/м², наблюдается появление подрезов. При использовании проволок № 4 и 5, шлаки которых имеют поверхностное натяжения в пределах 263 и 271 МДж/м², участки подрезов незначительны. При сварке проволоками № 6 и 7 (поверхностное натяжение шлаков 325 и 345 МДж/м²) шов почти полностью покрыт шлаком и подрезы не образуются. При использовании проволоки № 8 (поверхностное натяжение шлака 385 МДж/м²) подрезы не наблюдаются, но кроющая способность шлака недостаточна. Таким образом, при сварке проволоками, шлаки которых имеют низкое поверхностное натяжение, они растекаются по краям шва, а при использовании проволок, шлаки которых имеют высокое поверхностное натяжение, последние не покрывают поверхность шва полностью, что ухудшает его вид и формирование. В результате проведенных исследований установлено, что лучшие сварочно-технологические свойства достигаются при сварке порошковыми проволоками, у которых шлаки данной солеоксидной системы имеют поверхностное натяжение в пределах 300...350 МДж/м².

Таким образом, зная поверхностное натяжение шлака и жидкого металла, можно прогнозировать сварочно-технологические свойства самозащитных порошковых проволок по таким показателям, как кроющая способность шлака и формирование шва на вертикальной плоскости.

Выводы

1. Исследована зависимость поверхностного натяжения шлака солеоксидной системы BaF₂-LiF-MgO от состава и температуры расплава. Отсутствие максимумов и минимумов на изолиниях поверхностного натяжения указывает на отсутствие комплексных ионов, поэтому система BaF₂-LiF-MgO представляет собой твердый раствор во всем поле кристаллизации. Поскольку поверхностное натяжение не зависит от температуры, можно сде-



лать вывод об отсутствии структурных изменений в шлаковой системе выше линии ликвидуса. Поверхностное натяжение шлакового расплава монотонно возрастает с увеличением концентрации оксида марганца.

2. В самозащитных порошковых проволоках, используемых для сварки в различных пространственных положениях, для снижения поверхностного натяжения металлического расплава желательно ограничивать содержание алюминия до 1,5, а марганца до 2 %.

3. Для предотвращения растекания шлака к краям шва и возникновения подрезов сварочные шлаки должны иметь поверхностное натяжение не ниже 300 МДж/м². Лучшие сварочно-технологические свойства при сварке самозащитной порошковой проволокой в различных пространственных положениях достигаются при поверхностном натяжении шлака 300...350 МДж/м².

1. *Изучение* свойств шлаковых расплавов применительно к обоснованию составов сварочных флюсов. Структура / В. Г. Кузьменко, В. И. Галинич, В. С. Токарев и др. // Автомат. сварка. — 1999. — № 11. — С. 38–41.

Dependence of surface tension of the salt-oxide BaF₂-LiF-MgO system slag upon its composition and temperature has been investigated. The effect of surface tension on welding-technological properties of flux-cored wires in welding in various spatial positions has been considered.

2. *Подгаецкий В. В., Кузьменко В. Г.* Сварочные шлаки. — Киев: Наук. думка, 1988. — 256 с.
3. *Соколов О. К.* Расчет поверхностного натяжения расплавленных галогенидов на границе с инертной фазой при температуре плавления // Изв. вузов. Цвет. металлургия. — 1963. — № 4. — С. 55–58.
4. *Аппен А. А.* Опыт классификации компонентов по их влиянию на поверхностное натяжение силикатных расплавов // Журн. физ.-химии. — 1952. — 26, № 10. — С. 2215–2218.
5. *Попель С. И.* Теория металлургических процессов. — М.: ВИНТИ, 1971. — 132 с.
6. *Попель С. И., Павлов В. В.* Термодинамический расчет поверхностного натяжения растворов // Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. — Нальчик: Кабард.-Балкар. кн. изд-во, 1965. — С. 46–60.
7. *Подгаецкий В. В.* Оценка поверхностного натяжения расплавов сварочных шлаков // Автомат. сварка. — 1992. — № 5. — С. 26–28.
8. *Павлов В. В., Попель С. И.* Расчет поверхностного натяжения и поверхностных концентраций компонентов в оксидных расплавах // Изв. вузов. Цвет. металлургия. — 1964. — № 6. — С. 30–37.
9. *Френкель Я. И.* Кинетическая теория жидкостей. — М.: Изд-во АН СССР, 1945. — 352 с.
10. *Мойсов Л. П., Бурyleв Б. П.* Расчет свойств металлических и шлаковых систем при разработке сварочных материалов // Свароч. пр-во. — 1997. — № 2. — С. 18–20.

Поступила редакцию 03.01.2001