

ОСОБЕННОСТИ РАСПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ СТАЛЕЙ

Досліджено залежності швидкості розплавлення металу електроду при дуговому зварюванні від зварювального струму. Розглянуто випадки зварювального процесу без випаровування металу електроду, з випаровування металу електроду та з попереднім нагріванням електроду. Встановлено, що використання лінійної апроксимації залежностей швидкості розплавлення металу електроду від струму більш перспективне, ніж використання пропорційної апроксимації, оскільки лінійна більш точна у всьому діапазоні зварювальних струмів.

Исследованы зависимости скорости расплавления металла электрода при дуговой сварке от сварочного тока. Рассмотрены случаи сварочного процесса без испарения металла электрода, с испарением металла электрода и с предварительным нагревом электрода. Определено, что использование линейной аппроксимации зависимостей скорости расплавления металла электрода от тока перспективнее, чем использование пропорциональной аппроксимации, т.к. линейная более точная во всем диапазоне сварочных токов.

ВВЕДЕНИЕ

Скорость плавления электрода существенно влияет на производительность процесса дуговой сварки, и определяет его энергетическую и экономическую эффективность. Исследование зависимости скорости плавления от различных параметров процесса является актуальным, особенно в настоящее время, когда вопросы ресурсо- и энергосбережения вышли на первый план.

Скорость плавления металла электрода зависит от многих факторов (состава электрода и покрытия, флюса, защитного газа, величины сварочного тока, его вида и полярности, длины вылета и диаметра электрода и др.). Исторически сложилось так, что аппроксимация экспериментальных зависимостей массовой скорости плавления G_{melt} (производительности плавления) от тока сварки I полагалась прямо пропорциональной:

$$G_{melt} = \alpha_{melt} I. \quad (1)$$

Коэффициенту пропорциональности α_{melt} дали название коэффициента расплавления электрода [1-3]. Накоплено большое количество данных по его экспериментальному измерению. Но эти данные плохо поддаются систематизации, т.к. крайне разрознены. Оказалось, что величина коэффициента расплавления α_{melt} сама сложным образом зависит от величины сварочного тока I , его вида и полярности.

В работе [4] получена аппроксимация эмпирической зависимости, которая является линейной

$$G_{melt} = \alpha_{melt} I + G_0. \quad (2)$$

Интуитивно трудно понять наличие в формуле (2) члена, который не зависит от тока, ведь при нуле тока и скорость расплавления нулевая. Но в работе [4] экспериментально доказана адекватность формулы (2). Целью настоящей работы является теоретическое обоснование линейной зависимости скорости расплавления и выявлению границ областей ее применимости.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ ОБЛАСТЕЙ

По современным представлениям с привлечением принципа детального равновесия [5, 6] мощность P , поступающая от сварочной дуги в каплю, равна:

$$P = U_{eq} I, \quad (3)$$

где U_{eq} – эквивалентное напряжение при расплавлении дугой [4] имеет различный вид:

$$U_{eq} = U_a + \varphi + \frac{3k_B T_A}{2q_e}, \quad (4)$$

$$U_{eq} = U_k - \varphi - \frac{3k_B T_A}{2q_e}, \quad (5)$$

для сварки на обратной и прямой полярности, соответственно. Здесь U_a – анодное падение напряжения, U_k – катодное падение напряжения, φ – работа выхода электрона, T_A – температура плазмы дуги, $k_B = 1.38066 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, $q_e = 1.6022 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона.

Последний член в правых частях формул (4) и (5) при сварке на обратной полярности учитывает энергию, передаваемую аноду при соударении электрона с анодом, а при сварке на прямой полярности – энергию, которую необходимо затратить для разгона электрона в катодной области до скоростей электронов в плазме.

При расчетах были использованы более простые формулы, не содержащие такого параметра, как температура плазмы дуги

$$U_{eq} = U_a + \varphi + \frac{3}{29} U_i, \quad (6)$$

$$U_{eq} = U_k - \varphi - \frac{3}{29} U_i, \quad (7)$$

где U_i – потенциал ионизации элемента в составе проволоки (или обмазки) с наименьшим потенциалом ионизации. Подробно такой подход описан в работе [7].

Обычно при обратной полярности $7,4 \text{ В} \leq U_{eq} \leq 9,2 \text{ В}$, при сварке на прямой полярности $7,1 \text{ В} \leq U_{eq} \leq 8,6 \text{ В}$.

ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДА БЕЗ УЧЕТА ИСПАРЕНИЯ МЕТАЛЛА

В этом случае тепловложение в металл электрода от дуги, которое характеризуется мощностью P , идет на нагрев металла электрода, поступающего в зону плавления, от температуры электрода T_0 до температуры капли T_{drop} , и на тепло, затрачиваемое на фазовые переходы. Этот баланс мощностей может быть записан следующим образом:

$$P = U_{eq}I = G_{melt} \left(\int_{T_0}^{T_{drop}} C_p(T) dT + \Sigma\lambda \right), \quad (8)$$

где $C_p(T)$ – удельная теплоемкость стали, $\Sigma\lambda$ – сумма удельных теплот фазовых превращений железа.

Из формулы (8) легко найти выражение для скорости расплавления

$$G_{melt} = \frac{U_{eq}I}{\int_{T_0}^{T_{drop}} C_p(T) dT + \Sigma\lambda}. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что скорость расплавления G_{melt} сильно зависит от температуры капли расплавленного металла.

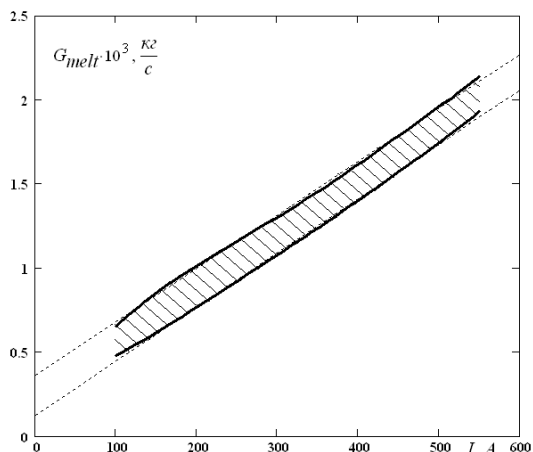


Рис. 1. Область изменения скорости расплавления G_{melt} для случая, когда испарением с поверхности капли можно пренебречь и подогрев электрода отсутствует (обратная полярность)

Мы будем оперировать со средней температурой капли T_{drop} , являющейся важным технологическим параметром, влияющим на глубину проплавления сварного шва. Следуя методике предложенной в работе [7] будем полагать, что на границе капли с электродом температура капли близка к температуре плавления металла T_{melt} , а на границе капли с дугой температура капли близка к температуре кипения T_b металла электрода, при этом, благодаря интенсивному перемешиванию в середине капли температура выравнивается, и эту температуру мы будем рассматривать как среднюю температуру T_{drop} , которая в свою очередь зависит от величины сварочного тока.

Подставляя в формулу (9) значения U_{eq} из выражения (6) для обратной полярности и значения T_{drop} на верхней и нижней границах зоны обратной полярности [7], получим кривые на рис. 1, ограничивающие область возможных значений G_{melt} при сварке на обратной полярности и отсутствии испарения с поверхности капли.

Воспользуемся также результатами работы [7] по определению зависимостей средней температуры капли T_{drop} от сварочного тока.

Подставляя в формулу (9) значения U_{eq} из выражения (7) для прямой полярности и значения T_{drop} на верхней и нижней границах зоны обратной полярности [7], получим кривые на рис. 2, ограничивающие область

возможных значений G_{melt} при сварке на прямой полярности и отсутствии испарения с поверхности капли.

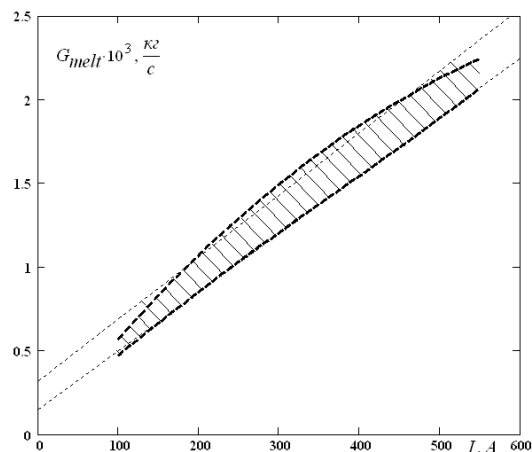


Рис. 2. Область изменения скорости расплавления G_{melt} для случая, когда испарением с поверхности капли можно пренебречь и подогрев электрода отсутствует (прямая полярность)

Как видно из рис. 1, зависимости скорости расплавления от тока почти идеально описываются линейными зависимостями (2), которые изображены тонкими пунктирными линиями. При этом значения коэффициентов расплавления α_{melt} для нижней ($3,22 \cdot 10^{-6}$ кг/(с·А)) и верхней ($3,18 \cdot 10^{-6}$ кг/(с·А)) границ очень близки. Отличие аппроксимации нижней границы в значении свободного члена G_0 : $1,24 \cdot 10^{-4}$ кг/с и $3,60 \cdot 10^{-4}$ кг/с.

Для сварки на прямой полярности (см. рис.2) только нижняя граница хорошо аппроксимируется линейной зависимостью (2). Верхняя граница значительно отклоняется от прямой линии (при малых токах до 20 %).

ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДА С УЧЕТОМ ИСПАРЕНИЯ МЕТАЛЛА С ПОВЕРХНОСТИ КАПЛИ

Необходимо отметить, что пренебрежение процессами испарения приводит к получению завышенных значений скорости расплавления G_{melt} .

Поэтому при более уточненном подходе учтем влияние испарения металла с поверхности капли. Так как на практике массовая скорость расплавления G_{melt} измеряется массой укорочения электрода в единицу времени, то масса испарившегося металла G_{ev} в единицу времени уже содержится в G_{melt} . Пусть его доля в расплавленном металле G_{melt} составляет ξ . Тогда можно записать $G_{ev} = \xi \cdot G_{melt}$, а количество металла, оставшегося в расплавленном состоянии, будет равно $G_{melt} \cdot (1 - \xi)$.

Баланс мощностей в этом случае может быть записан следующим образом:

$$U_{eq}I = (1 - \xi) G_{melt} \left(\int_{T_0}^{T_{drop}} C_p(T) dT + \Sigma\lambda \right) + \dots \quad (10)$$

$$\dots + \xi G_{melt} \left(\int_{T_0}^{T_A} C_p(T) dT + \Sigma\lambda + r \right).$$

Здесь выражение в квадратных скобках представляет теплосодержание капель расплавленного

металла при температуре T_{drop} , а выражение в фигурных скобках представляет некоторое усредненное теплосодержание паров железа (r – удельная теплота парообразования железа) при температуре плазмы дуги T_A (пары железа попадают в столб дуги и верхний предел интегрирования в интеграле в фигурных скобках согласно принципа детального равновесия должен быть равен T_A).

Из уравнения (10) найдем формулу для определения скорости расплавления G_{melt} при учете испарения с поверхности капли и отсутствии коротких замыканий

$$G_{melt} = \frac{U_{eq} I}{\left\{ (1-\xi) \left(\int_{T_0}^{T_{drop}} C_p(T) dT + \Sigma\lambda \right) + \dots \right.} \quad (11)$$

$$\left. \dots + \xi \left(\int_{T_0}^{T_A} C_p(T) dT + \Sigma\lambda + r \right) \right\}$$

Величина ξ согласно исследованиям [8] составляет около 9..10% и не зависит от величины сварочного тока. Вообще величина G_{ev} по своей сути должна быть обратно пропорциональна скрытой теплоте парообразования и прямо пропорциональна удельной энергии, идущей на расплавление металла [9], поэтому ξ близко к величине

$$\xi = \frac{G_{ev}}{G_{melt}} = \frac{\int_{T_0}^{T_{drop}} C_p(T) dT + \Sigma\lambda}{\int_{T_0}^{T_A} C_p(T) dT + \Sigma\lambda + r} \quad (12)$$

Например, при $T_b = 1808$ К, $T_0 = 293$ К и $T_A = 6266$ К, доля ξ , определенная по формуле (12), будет равна $\xi = 10\%$. Эта формула проще и существенно отличается от подобной формулы, предложенной в работе [9].

В случае отсутствия подогрева электрода, подставляя в формулу (11) $T_0 = 293$ К, $\xi = 10\%$ и значения U_{eq} из выражений (6) для обратной полярности и значения T_{drop} на верхней и нижней границах зоны обратной полярности [7], получим кривые на рис. 3, ограничивающие область возможных значений G_{melt} при сварке на обратной полярности при учете испарения с поверхности капли. Аналогично, получим кривые на рис. 4, ограничивающие область возможных значений G_{melt} при сварке на прямой полярности при учете испарения с поверхности капли при отсутствии подогрева электрода.

Сравнение кривых на рис. 3 и 4, полученных с учетом испарения металла, с кривыми на рис. 1 и 2, полученных при отсутствии испарения металла, показывает, что скорость расплавления G_{melt} при учете испарения с поверхности капли уменьшается в 1,4..1,8 раза. Поэтому можно сделать вывод, что учет влияния испарения обязателен.

Хотя величина ξ невелика, второе слагаемое в знаменателе выражения (11) сравнимо по величине с первым слагаемым из-за большой величины теплосодержания паров железа, что, собственно, и обуславливает существенное снижение скорости расплавления G_{melt} при учете испарения металла с поверхности капли.

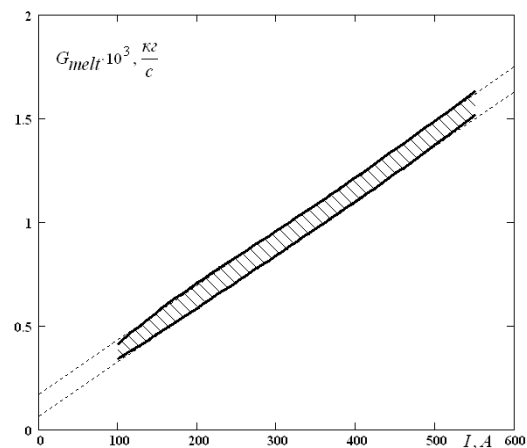


Рис. 3. Область изменения скорости расплавления G_{melt} при учете испарения с поверхности капли и отсутствии подогрева электрода (обратная полярность)

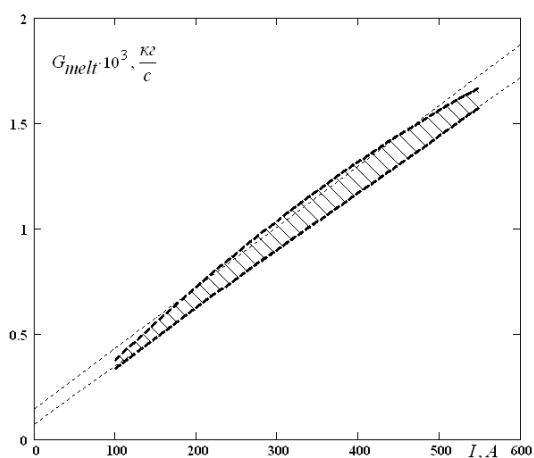


Рис. 4. Область изменения скорости расплавления G_{melt} при учете испарения с поверхности капли и отсутствии подогрева электрода (прямая полярность)

Несмотря на различия скоростей расплавления с учетом испарения и без такового, характер кривых почти не изменяется: они достаточно хорошо аппроксимируются линейной функцией (2).

ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДА С УЧЕТОМ ЕГО ПОДОГРЕВА

Отметим, что температура электрода, близкая к $T_0 = 293$ К, наблюдается при подводной сварке, а также в начале сварки штучным электродом при ручной дуговой сварке. В конце сварки штучным электродом на воздухе, также при механизированной сварке, особенно с длинным вылетом, электрод может подогреваться на 400°C ($T_0 = 693$ К). При этом уравнение (12) дает $\xi = 8,5\%$ и, пересчитывая формулу (11) при этих новых значениях T_0 и ξ , получим зависимости для G_{melt} от тока.

Графики зависимостей приводить не будем, но отметим следующее. Несмотря то, что скорости расплавления с учетом предварительного подогрева больше, чем без подогрева, характер кривых не изменяется: они достаточно хорошо аппроксимируются линейной функцией (2).

ВЫВОДЫ

1. Использование пропорционального закона для аппроксимаций зависимостей скорости расплавления металла электрода при дуговой сварке нерационально, т.к. коэффициент пропорциональности (так называемый коэффициент расплавления электрода) сложным образом зависит от тока сварки и других параметров сварочного процесса.

2. Использование линейного закона для аппроксимаций зависимостей скорости расплавления металла электрода при дуговой сварке оправдано тем, что он дает высокую точность во всем диапазоне сварочных токов и для различных случаев протекания сварочного процесса: без испарения металла электрода, с испарением, а также с предварительным подогревом электрода.

3. Высокая точность линейной аппроксимации зависимостей скорости расплавления металла электрода дает возможность решать задачи энерго- и ресурсосбережения для процесса дуговой сварки.

ПОДДЕРЖКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Научные исследования, результаты которых изложены выше, проведены при финансовой поддержке "Державного фонду фундаментальних досліджень України" в рамках совместного украинско-российского проекта ДФФД-РФФИ-2011 (грант Ф40.7/047).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы сварки / [В.В. Фролов, В.А. Винокуров, В.Н. Волченко и др.] – М.: Высш. шк., 1970. – 592 с.
2. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
3. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. акад. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
4. Варуха Е.Н. Расчет скорости плавления предварительно нагретого электрода при сварке в углекислом газе // Сварочное производство. – 2012. – № 2. – С. 3-8.
5. Nakamura T. Wire Melting Behavior by Non-Steady Heat Conduction Numerical Analysis in Gas Metal Arc Welding. Development of Ultra-Narrow Gap GMA Welding Process. Report 2. / T. Nakamura, K. Hiraoka // Quarterly Journal of the Japan Welding Society. – 2002. – Vol.20, No.1. – P. 53-62.
6. Ленивкин В.А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
7. И.В. Пентегов Аналитическое определение коэффициента расплавления электрода при дуговой сварке сталей / И.В. Пентегов, В.Н. Сидоренко, О.И. Петриенко, А.М. Жерносеков // Вестник Черниговского Государственного Технологического ун-та. – 2012. – №2 (57). – С. 89-96.
8. Петров А.В. Перенос металла в дуге при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов / А.В. Петров // Автоматическая сварка. – 1955. – №2. – С. 26-33.
9. Дятлов В.И. Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке [Новые проблемы сварочной техники (сборник статей)]. – Киев: Техника, 1964. – С. 167-182.

Bibliography (transliterated): 1. Teoreticheskie osnovy svarki / [V.V. Frolov, V.A. Vinokurov, V.N. Volchenko i dr.] - M.: Vyssh. shk., 1970. - 592 s. 2. Leskov G.I. `Elektricheskaya svarochnaya duga. - M.: Mashinostroenie, 1970. - 335 s. 3. Tehnologiya `elektricheskoy svarki metallov i splavov plavlaniem. Pod red. akad. B.E. Patona. - M.: Mashinostroenie, 1974. - 768 s. 4. Varuha E.N. Raschet skorosti plavljeniya predvaritel'no nagretogo `elektroda pri svarke v uglekisloe gaze // Svarochnoe proizvodstvo. - 2012. - № 2. - S. 3-8. 5. Nakamura T. Wire Melting Behavior by Non-Steady Heat Conduction Numerical Analysis in Gas Metal Arc Welding. Development of Ultra-Narrow Gap GMA Welding Process. Report 2. / T. Nakamura, K. Hiraoka // Quarterly Journal of the Japan Welding Society. - 2002. - Vol.20, No.1. - P. 53-62. 6. Lenivkin V.A. Tehnologicheskie svojstva svarochnoj dugi v zaschitnyh gazah / V.A. Lenivkin, N.G. Dyurgerov, H.N. Sagirov - M.: Mashinostroenie, 1989. - 264 s. 7. I.V. Pentegov Analiticheskoe opredelenie ko`efficianta rasplavljeniya `elektroda pri dugovoj svarke stalej / I.V. Pentegov, V.N. Sidorec, O.I. Petrienko, A.M. Zhernosekov // Vestnik Chernigovskogo Gosudarstvennogo Tehnologicheskogo un-ta. - 2012. - №2 (57). - S. 89-96. 8. Petrov A.V. Perenos metalla v duge pri svarke pлавящимся `elektrodom v srede zaschitnyh gazov / A.V. Petrov // Avtomaticheskaya svarka. - 1955. - №2. - S. 26-33. 9. Dyatlov V.I. `Elementy teorii perenosa `elektrodnogo metalla pri `elektrodugovoj svarke [Novye problemy svarochnoj tehniki (sbornik statej)]. - Kiev: Tehnika, 1964. -S. 167-182.

Поступила 20.09.2012

Сидоренко Владимир Николаевич, д.т.н., с.н.с., в.н.с.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
отдел физики газового разряда и техники плазмы.
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11
тел. (044) 205-23-47, e-mail: sidvn@ua.fm

Жерносеков Анатолий Максимович, к.т.н., с.н.с.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
отдел источников питания
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11
тел. (044) 200-44-78, e-mail: maximan23@i.ua

Пентегов Игорь Владимирович, д.т.н., проф., в.н.с.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
отдел электротермии
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11
тел. (044) 206-13-88, e-mail: magn@i.com.ua

Петриенко Ольга Игоревна, к.т.н.
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
отдел электротермии
03680, Киев-150, ул. Боженко, 11
тел. (044) 205-21-80, e-mail: svpustovoit@gmail.com

Sydorets V.M., Zhernosekov A.M., Pentegov I.V., Petrienko O.I.

Features of electrode melting in arc welding of steels.

Dependences of electrode metal melting rate upon welding current under arc welding have been investigated. Cases of the welding process with and without the electrode metal evaporation and with the electrode preliminary heating have been considered. It is determined that application of linear approximation of the electrode metal melting rate versus welding current is more efficient, as compared with proportional approximation, since it is more accurate within the entire range of welding currents.

Key words – arc welding, welding current, electrode metal melting, approximation.