



ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ШЛАКОВОЙ ВАННЫ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ ПРОВОЛОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Ю. Н. ЛАНКИН, д-р техн. наук, Л. Ф. СУШИЙ, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены уравнения и зависимости электрической проводимости шлаковой ванны от заглубления и положения проволочного электрода при электрошлаковой сварке. Представлены результаты моделирования проводимости шлаковой ванны с помощью электролитической ванны.

Ключевые слова: электрошлаковая сварка, электропроводность шлаковой ванны, проволочный электрод, моделирование, электролитическая ванна

Удельное сопротивление расплавленного шлака на несколько порядков превышает удельное сопротивление токоподводящих кабелей и свариваемого металла. Поэтому сопротивление шлаковой ванны $R_{\text{шл}}$ в значительной мере определяет значение сварочного тока, а следовательно, процесс плавления электрода и его устойчивость.

Для определения закономерностей изменения сопротивления шлаковой ванны при электрошлаковом переплаве (ЭШП) в работе [1] исследовали распределение потенциала в электролите, помещенном в мензурку с ртутным электродом на дне. В электролит погружали покрытый платиной титановый электрод. Полученные результаты описаны нелинейным уравнением

$$R = C \left(\frac{S}{D^2} \right) \left(\frac{S}{d} \right)^\alpha \left(\frac{p}{d} \right)^\gamma, \quad (1)$$

где R — общее сопротивление; S — межэлектродный промежуток; D — внутренний диаметр мензурки; d — диаметр электрода; p — заглубление электрода; C , α , γ — константы, нелинейно зависящие от коэффициента заполнения, значение которого составляет $1,07 \leq D/d \leq 6,6$.

Зависимость (1) справедлива для ЭШП с изолированным кристаллизатором. При моделировании электрошлаковой сварки (ЭШС) мензурка должна быть металлическая. Поэтому для ЭШС формулу (1) можно использовать только как возможный вид зависимости сопротивления шлаковой ванны от ее параметров.

В работе [2] сопротивление шлаковой ванны при ЭШП представлено в виде двух параллельно соединенных сопротивлений: между заглубленной частью электрода и стенкой кристаллизатора R_1 , а также между концом электрода и поверх-

ностью ванны слитка R_2 . Эти сопротивления описаны следующими уравнениями:

$$R_1 = \frac{\rho L}{H}, \quad R_2 = \frac{\rho l}{\left[\frac{(C_1 + C_2)}{2} \right] \left[D - \frac{AL}{B} \right]}. \quad (2)$$

Здесь ρ — удельное сопротивление шлака, Ом·см; L — межэлектродный промежуток, см; A — поперечное сечение слитка, см²; l — расстояние между электродом и кристаллизатором, см; C_1 , C_2 — длина окружности соответственно электрода и кристаллизатора, см; B — площадь кольцевого зазора между электродом и кристаллизатором, см².

Авторы [2] полагают, что описанная модель дает достаточно точную аппроксимацию влияния различных параметров процесса ЭШП на характеристики сопротивления шлаковой ванны.

Формулы (2) выведены для круглого кристаллизатора, а уравнения (1) подразумевает нетокопроводящий кристаллизатор. При ЭШС шлаковая ванна глубиной h_s находится в прямоугольном «кристаллизаторе» шириной b_a (соответствует ширине сварочного зазора) и длиной (соответствует толщине свариваемых деталей). Ниже рассмотрим не сопротивление шлаковой ванны, а обратную ему величину — электрическую проводимость, поскольку при этом аналитические зависимости проще. Электрическая проводимость шлаковой ванны между погруженным в нее на глубину погружения (заглубление) электрода L_s в шлак и электропроводящими стенками шлаковой ванны можно представить в виде суммы электрических проводимостей между электродом и каждой стенкой:

$$G = \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^5 G_i.$$

В первом приближении длина стенок принята неограниченной. Для подсчета проводимости шлаковой ванны между электродом и одной из вертикальных стенок воспользуемся формулой



для емкости однопроводной линии и земли на единицу длины, заменив в ней диэлектрическую проницаемость среды ϵ_a средней по объему ванны удельной электрической проводимостью шлаковой ванны γ_s [3]:

$$G'_i = \frac{2\pi\gamma_s}{\ln\left(\frac{H_i + \sqrt{H_i^2 - r^2}}{r}\right)},$$

где H_i — расстояние от центра электрода до i -й стенки шлаковой ванны; r — радиус электрода; $H_3 = b_a - H_1$; $H_4 = S - H_2$. Для электрода, погруженного в шлак на глубину l_s , получим электрическую проводимость $G_i = l_s G'_i$.

При подсчете электрической проводимости шлаковой ванны между электродом и металлической ванной G_5 воспользуемся преобразованной формулой для емкости двух конечных цилиндров [4]:

$$G_5 = 2\pi\gamma_s \left(\frac{r^2}{2(h_s - l_s)} + \frac{2r}{\pi} \ln\left(\frac{4h_s}{h_s - l_s}\right) + \frac{l_s}{2} \right).$$

На рис. 1 представлена зависимость электрической проводимости шлаковой ванны от заглубления электрода при следующих условиях: глубина шлаковой ванны $h_s = 50$ мм; зазор $b_a = 30$ мм; толщина свариваемых деталей 40 мм; диаметр электрода $2r = 4$ мм; электрод находится в центре шлаковой ванны ($H_1 = H_3 = 15$ мм; $H_2 = H_4 = 20$ мм). Из рисунка видно, что электрическая проводимость шлаковой ванны при сварке проволочным электродом возрастает практически линейно с увеличением заглубления электрода. Вклад каждой из трех составляющих электрической проводимости (электрод–кромки изделия, электрод–ползуны, электрод–металлическая ванна) приблизительно одинаков.

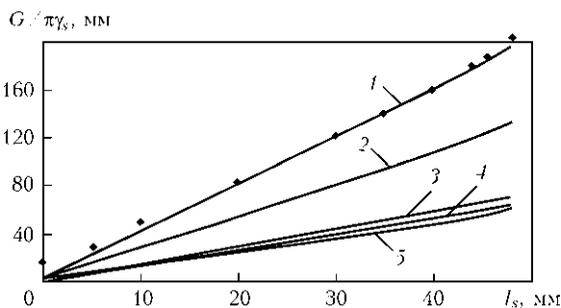


Рис. 1. Зависимость электрической проводимости шлаковой ванны от заглубления в нее электрода: 1 — полная проводимость шлаковой ванны G ; 2 — проводимость шлаковой ванны при изолированных ползунах $G_1 + G_3 + G_5$; 3 — проводимость промежутка электрод–ванна расплавленного металла G_5 ; 4 — проводимость промежутка электрод–кромки свариваемых деталей $G_1 + G_4$; 5 — проводимость промежутка электрод–ползуны $G_2 + G_3$

Зависимость электрической проводимости шлаковой ванны от положения электрода относительно кромок свариваемого изделия показана рис. 2. При расчете принято заглубление электрода $l_s = 25$ мм.

Следует заметить, что значение электрической проводимости участка электрод–ползуны несколько завышено. Поскольку теплопроводность медных ползунов высокая и они интенсивно охлаждаются водой, расплавленный шлак вблизи поверхности ползунов имеет пониженную по сравнению со средней по ванне температуру. Влияние температуры $T_{шп}$ на удельную электрическую проводимость жидкого шлака γ_s описывается уравнением [1]

$$\gamma_s = \gamma_0 \exp(-c/T_{шп}),$$

где γ_0, c — константы для данного шлака. Согласно [5], электропроводимость популярного флюса АН-8 изменяется от 0 (при 950 °С) до 4 Ом⁻¹·см⁻¹ (при 2000 °С). Таким образом, электрическая проводимость шлака уменьшается при понижении температуры, и вблизи поверхности ползунов образуется слой шлака с пониженной электрической проводимостью. Застывший шлак (гарнисаж) вообще можно считать неэлектропроводным. В расчетах электрическую проводимость этого слоя включают параллельно с G_4 и G_5 , уменьшая результирующую электрическую проводимость вплоть до нуля. К сожалению, как теоретические, так и экспериментальные оценки проводимости пограничного слоя отсутствуют. Поэтому общая электрическая проводимость шлаковой ванны находится где-то в промежутке между G и $G_1 + G_3 + G_5$. Однако зависимость электрической проводимости шлаковой ванны от заглубления электрода и положения относительно кромок свариваемых деталей качественно остается приблизительно той же.

Для проверки полученных зависимостей проведено моделирование на электролитической ванне. Размеры ванны и электрода приняты те же, что и в расчетах. В качестве электролита использована вода. Ванна выполнена из медной фольги,

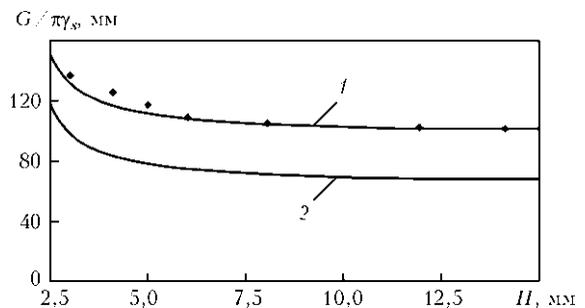


Рис. 2. Зависимость электрической проводимости шлаковой ванны от расстояния H между электродом и ближайшей кромкой свариваемой детали: 1, 2 — см. рис. 1



электрод — из стальной проволоки. Поскольку электрическая проводимость воды на несколько порядков ниже электрической проводимости металлов, то выбор рода металла для модели ванны и электрода значения не имеет. Для исключения электролитических явлений питание модели осуществлялось переменным током частотой в 1 кГц. На рис. 1 и 2 точками обозначены результаты моделирования после масштабирования для сопоставимости с расчетными кривыми, между представленными данными совпадение вполне удовлетворительное. Некоторое расхождение, наблюдаемое при незначительном заглублении электрода (см. рис. 1), можно объяснить влиянием мениска вследствие смачивания электрода.

Ввиду малой изученности и отсутствия достоверных данных в настоящей работе приэлектродные процессы на границе металл–шлак во внимание не принимались [5, 6]. Учет анодного и катодного падения напряжений качественно не меняет зависимости общего сопротивления шлаковой ванны от различных параметров процесса

ЭШС, выявление которых и является основной целью данного исследования.

Таким образом, определено, что при ЭШС проволочным электродом электрическая проводимость шлаковой ванны прямо пропорциональна заглублению электрода. Она почти не изменяется, если электрод расположен на расстоянии от стенки свариваемых деталей, больше его диаметра.

1. Омура Г., Вакабаяси М., Хосода Т. Анализ теплопередачи в процессе ЭШС // Электрошлаковый переплав: Материалы II Междунар. симп. по технологии электрошлакового переплава. — Киев: Наук. думка, 1973. — С. 180–202.
2. Томманни Ж. В., Край Д. А. Математическая модель ЭШП на постоянном токе // Там же. — 1973. — С. 221–231.
3. Говорков В. А. Электрические и магнитные поля. — М.: Энергия, 1968. — 488 с.
4. Гликман И. Я., Русин Ю. С. Расчет характеристик элементов цепей радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Сов. радио, 1976. — 160 с.
5. Электрошлаковая сварка и наплавка / Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
6. Митчел А. Механизм выделения и распространения тепла в процессе ЭШП // Электрошлаковый переплав: Материалы II Междунар. симп. по технологии электрошлакового переплава. — М.: Металлургия, 1971. — С. 80–92.

Formulae and dependencies of electrical conductivity of the slag pool upon deepening and position of wire electrode in electroslag welding are given. Results of modelling of conductivity of the slag pool by using the electrolytic bath are given.

Поступила в редакцию 17.07.2009



ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛА «WELDING JOURNAL» 2009, № 3

Y. F. Gao, H. Zhang, Z. W. Mao

РЕГИСТРАЦИЯ НАКЛОНА СВАРОЧНОЙ ГОЛОВКИ
И СЛЕЖЕНИЕ ЗА КРИВОЛИНЕЙНЫМ УГЛОВЫМ ШВОМ

Важно отрегулировать наклон сварочной головки во время автоматического слежения за криволинейным соединением при дуговой сварке. Проведено исследование на обнаружение отклонения и наклона сварочной головки, базирующееся на использовании сварочного тока для управления за передвижением робота при выполнении криволинейных угловых швов. Предложен новый метод обнаружения отклонения и наклона сварочной головки, основанный на токах дуги, полученных от высокоскоростного вращающего датчика дуги. Он использует метод наименьших квадратов для регулировки токов дуги на плоскости в трех измерениях. Отклоне-

ние и наклон сварочной головки проектируются на две ортогональные плоскости, так что они могут быть рассоединены и, таким образом, рассчитываться отдельно. Разработана передвижная сварочная роботизированная система, состоящая из дифференцированного аппарата и поперечно скользящего манипулятора. Для управления колесами робота и горизонтальным ползуном при слежении криволинейного углового шва разработан регулятор с нечетким алгоритмом. Результаты эксперимента показывают, что обнаружение и регистрация ошибок наклона и отклонения сварочной головки приблизительно равны $\pm 7,85^\circ$ и $\pm 0,42$ мм.