



РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ ПРИ СВАРКЕ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

Е. Н. ВАРУХА, д-р техн. наук, А. А. МОРОЗОВ, магистр (Головной аттестацион. центр южного региона РФ)

Представлена нелинейная модель проплавления изделия, описывающая зависимость глубины проплавления от параметров процесса механизированной сварки и наплавки в углекислом газе на токе обратной полярности.

Ключевые слова: дуговая сварка или наплавка, математическое моделирование, глубина проплавления, параметры режима сварки, защитный газ, обратная полярность

До настоящего времени нет достаточно точных и простых методик расчета и регистрации глубины проплавления изделия в процессе сварки. Это обусловлено многочисленными факторами, влияющими на нее, и сложностью их учета. Разработка таких методик позволила бы упростить процедуры расчета режимов сварки и создания систем адаптивного управления глубиной проплавления для сварочного оборудования.

Для проведения расчетов параметров режима сварки необходимо задание геометрических размеров сварного шва. При этом должна быть известна зависимость между глубиной проплавления и шириной шва и основными характеристиками процесса (ток и скорость сварки, напряжение на дуге, диаметр и вылет электрода).

До настоящего времени существовало довольно много работ, посвященных установлению связи между параметрами процесса сварки и геометрическими размерами шва. В решении этой задачи можно выделить три основных подхода:

- определение взаимосвязи режима сварки и размеров шва на основе экспериментальных данных [1];
- создание эмпирических уравнений, связывающих режим сварки и размеры шва методом формальной [2] и критериальной интерполяции [3];
- разработка систем аналитических уравнений, полученных из теории теплопередачи [4].

Каждый из них имеет недостатки: значительную трудоемкость получения экспериментальных данных; невысокую точность эмпирических моделей; сложность учета всех факторов, влияющих на распределение температуры в изделии. Бурное развитие вычислительной техники, наличие мощных прикладных компьютерных программ и разработка довольно совершенной математической модели плавления электрода [5] позволяют подойти к решению задачи построения математической модели проплавления изделия на более высоком уровне.

Целью настоящей работы явилась разработка модели для расчета глубины проплавления при наплавке и сварке в углекислом газе на токе обратной полярности стыковых соединений без разделки кромок с нулевым зазором.

Для получения экспериментальных данных была проведена серия опытов по наплавке валиков на пластины из стали СтЗсп толщиной 12 мм в углекислом газе (расход 15...16 л/мин). Наплавку (сварку) осуществляли от преобразователя ПСГ-500 с жесткой вольт-амперной характеристикой в диапазоне напряжений 28...43 В и диапазоне токов 120...500 А. Скорость наплавки изменяли ступенчато от 17,6 до 38,5 м/ч. В качестве электрода использовали сварочные проволоки Св-08Г2С номинального диаметра $d_s = 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0$ мм. Для последующих расчетов принимали фактические размеры d_s , а именно: 0,97; 1,16; 1,4; 1,57 и 1,97 мм. Скорость подачи проволоки в процессе сварки изменяли в пределах от 165 до 650 м/ч. Расстояние от торца токоподводящего мундштука до поверхности пластины выставляли 18, 20 и 22 мм, токоподводящие мундштуки были выполнены из меди марки М0. Наплавленные пластины разрезали поперек валиков в двух местах. Выполняли макрошлифы, по которым с точностью не более $\pm 0,1$ мм измеряли геометрические размеры швов.

Для статистической обработки использовали четыре значения каждого из измеренных параметров без их усреднения. Такой подход позволяет получить большую точность последующей математической обработки экспериментальных данных, поскольку среднеквадратические характеристики более точно отражают изучаемые закономерности, чем их среднеарифметические значения.

При разработке модели использовали метод многофакторного регрессионного анализа, реализован-

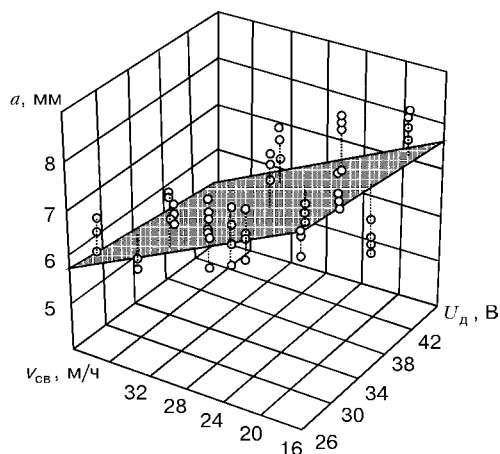


Рис. 1. Зависимость глубины проплавления a от напряжения на дуге U_d и скорости сварки $v_{св}$ при $d_s = 1,6$ мм; $v_{п} = 554$ м/ч

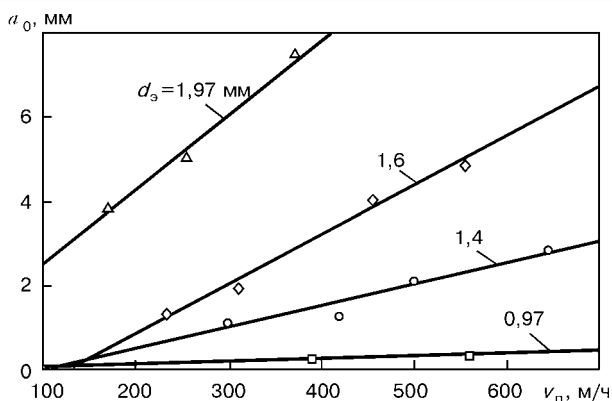


Рис. 2. Зависимость величины a_0 от скорости подачи электродной проволоки при ее различных диаметрах

ный в прикладной программе «Statistica». Для расчета глубины проплавления в качестве независимых переменных использовали напряжение на дуге U_d , массовую скорость подачи v_m и скорость сварки $v_{св}$.

Исходя из классических представлений о закономерностях проплавления изделия и полученных экспериментальных данных, был задан следующий вид искомой формулы для расчета глубины проплавления

$$a = b_0 + b_1 v_m + b_2 U_d + b_3 v_{св}, \quad (1)$$

где a — глубина проплавления, мм; b_0, b_1, b_2, b_3 — эмпирические коэффициенты.

Для определения значений коэффициентов уравнения (1) с помощью метода наименьших квадратов были построены линейные зависимости $a = f(U_d, v_{св})$ при фиксированных значениях d_s и v_n , одна из которых представлена на рис. 1. При нулевых значениях U_d и $v_{св}$ полученная плоскость пересекает ось предикат в точке a_0 , значение которой в каждом случае различное, но линейно зависящее от диаметра электродной проволоки и скорости ее подачи (рис. 2).

Для определения величины a_0 было предложено рассматривать ее зависимость не от линейной скорости подачи проволоки v_n , а от ее массовой скорости подачи v_m (рис. 3). Установлено, что a_0 практически не зависит от диаметра и возрастает с увеличением v_m . С помощью линейной аппроксимации получена следующая зависимость:

$$a_0 = -2,04 + 4,95 v_m. \quad (2)$$

Таким образом мы определили значения коэффициентов b_0 и b_1 из (1): $b_0 = 2,04$ мм, $b_1 = 4,95$ мм·с/г.

Подставив значения b_0 и b_1 в уравнение (1), по экспериментальным данным с помощью метода наименьших квадратов были определены значения коэффициентов b_2 и b_3 для различных $v_{св}$. Коэффициенты b_2 и b_3 могут быть описаны следующими зависимостями

$$b_2 = -1,5 \cdot 10^{-4} v_{св}^2 + 6,1 \cdot 10^{-3} v_{св} - 4,68 \cdot 10^{-2}, \quad (3)$$

$$b_3 = \frac{6,4 \cdot 10^{-3} v_{св}^2 - 0,25 v_{св} + 3,72}{v_{св}} + \frac{6,8 \cdot 10^{-3} v_{св}^2 + 0,52 v_{св} - 15,41 - \frac{115,5}{v_{св}}}{v_{св}} v_m. \quad (4)$$

Определение всех коэффициентов уравнения (1) позволило описать искомую зависимость с достаточной для практических целей точностью (коэффициент корреляции с экспериментальными данными составляет 0,92). Полученная модель нелинейна относительно параметров режима сварки (рис. 4).

Появление области роста глубины проплавления при увеличении скорости сварки противоречит некоторым существующим моделям расчета глу-

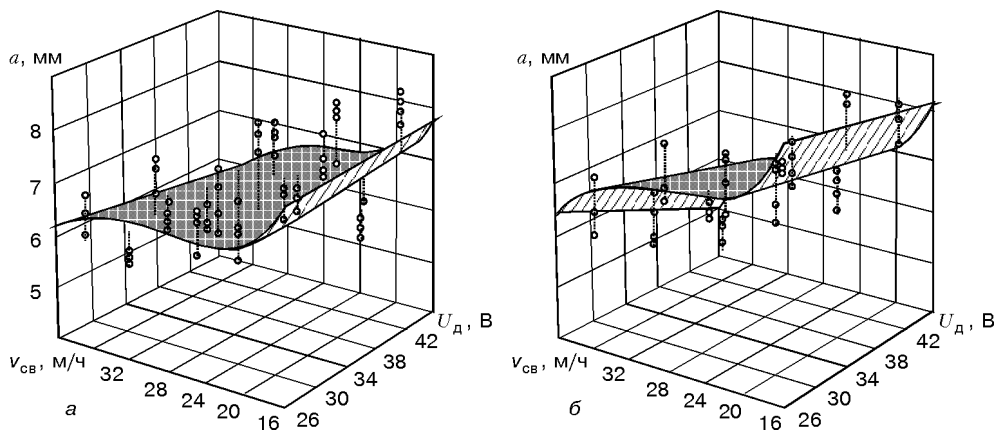


Рис. 4. Зависимость глубины проплавления от напряжения на дуге и скорости сварки: а — $d_s = 1,6$ мм; $v_n = 2,4$ г/с; б — $d_s = 1,97$ мм; $v_n = 2,5$ г/с (точки — экспериментальные данные)

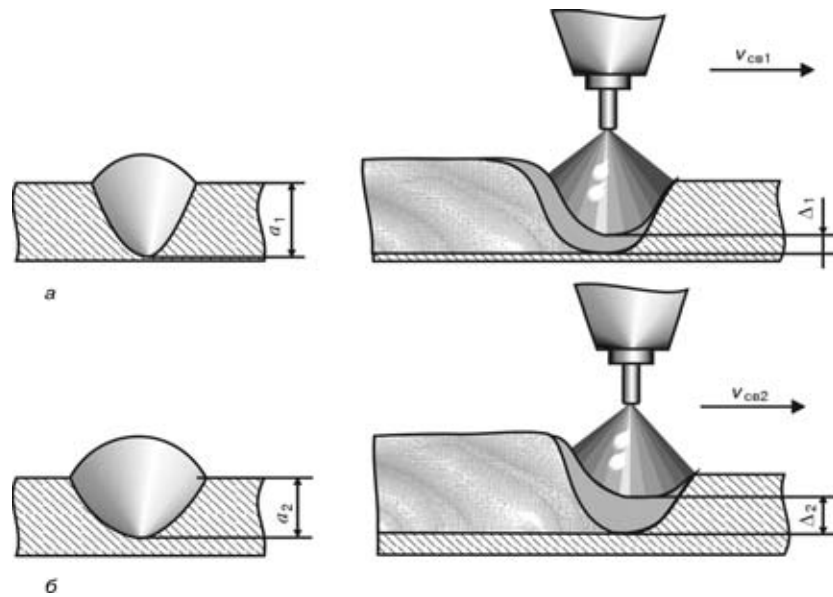


Рис. 5. Влияние толщины жидкой прослойки Δ под дугой на глубину проплавления при изменении скорости сварки ($v_{св1} > v_{св2}$)

бины проплавления. Однако этот результат подтверждается исследованиями в области влияния толщины жидкой прослойки под дугой на глубину проплавления [6, 7].

Рост глубины проплавления при увеличении скорости сварки в определенном диапазоне объясняется тем, что жидкий металл ванны вытесняется давлением дуги в хвостовую часть и не успевает подтекать под дугу за счет собственной массы. Таким образом, энергия дуги расходуется главным образом на плавление основного металла, а не на перегрев расплавленного (рис. 5).

Полученную модель сравнивали с известной моделью Акулова. Сравнение проводили для $d_э = 1,4; 1,6; 2,0$ мм при различных параметрах режима сварки. В качестве критерия оценки точности расчетных моделей использовали соответствие результатов расчетов экспериментальным данным.

Для наглядности результаты сравнения выводили в виде графиков зависимостей глубины проплавления от скорости сварки при фиксированных значениях $d_э, v_п, U_д$. Поведение расчетных моделей при различных скоростях подачи электродной проволоки и значениях напряжения на дуге для $d_э = 2,0$ мм показано на рис. 6.

Как видно из рис. 6, зависимость глубины проплавления от скорости сварки, соответствующая модели Акулова, имеет вид гиперболы. Недостатком такого описания можно считать неадекватный рост глубины проплавления при малых значениях $v_{св}$ и стремление к некоторому ненулевому значению при высоких скоростях сварки.

Расчеты, проводимые по модели Акулова, хорошо совпадают с экспериментальными данными в диапазоне скоростей сварки от 28 до 40 м/ч. Увеличение напряжения и уменьшение скорости подачи электродной проволоки приводит к возрастанию ошибки.

Можно сделать вывод, что модель Акулова адекватно отражает действительные значения глубины проплавления только в жестких рамках ограничений по скорости сварки, скорости подачи электродной проволоки и напряжению на дуге.

Анализ данных расчета по разработанной модели показывает, что при малых скоростях сварки напряжение на дуге практически не влияет на глубину проплавления. При увеличении $v_{св}$ степень влияния $U_д$ возрастает, при этом с повышением напряжения на дуге глубина проплавления уменьшается. Увеличение $v_{св}$ сначала приводит к резкому снижению глубины проплавления, а затем к небольшому ее повышению. На больших скоростях сварки глубина проплавления вновь начинает уменьшаться.

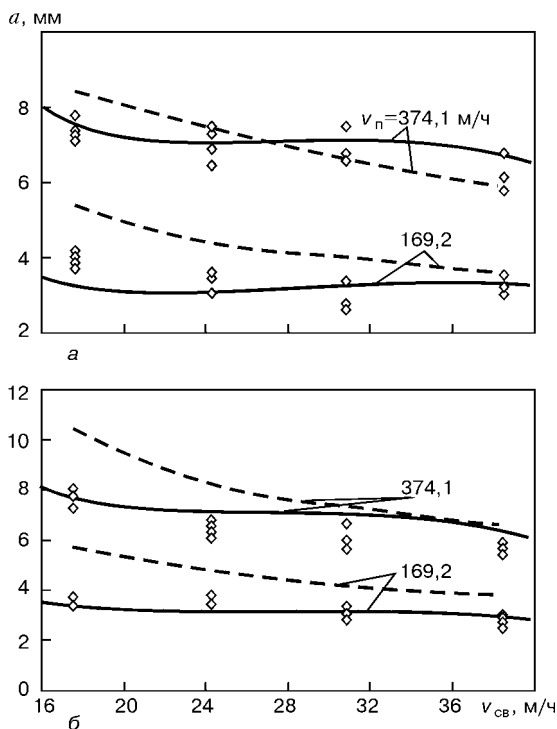


Рис. 6. Зависимость глубины проплавления от скорости сварки для $d_э = 2,0$ мм и $U_д = 30$ (а) и 40 В (б): сплошные кривые — результат расчета по полученной модели; штриховые — по модели Акулова



Полученная модель позволяет заключить, что при определенном напряжении на дуге и/или скорости сварки глубина проплавления становится практически равной нулю, что особенно важно при расчете параметров режима сварки.

Если в формулу (1) ввести известную зависимость v_m от тока сварки $I_{св}$, вылета $h_э$, диаметра и химического состава сварочной проволоки [5], то полученная формула может быть использована для решения обратной задачи — по заданному значению глубины проплавления, диаметра и вылета сварочной проволоки может быть рассчитан сварочный ток, т. е. могут значительно упроститься инженерные расчеты режимов сварки.

Установленные в процессе исследований закономерности могут применяться при разработке автоматизированных систем управления глубиной проплавления изделия в процессе наплавки (сварки), для учета влияния на глубину проплавления других материалов электродных проволок и изделия, защитных сред и условий наплавки (сварки). Например, для описания процесса сварки с разделкой кромок и с зазором между свариваемыми элементами.

Выводы

Presented is the non-linear model of penetration of a work piece, describing dependence of the penetration depth upon parameters of the process of automatic CO₂ welding and surfacing at a reverse polarity current.

1. Разработана модель для расчета глубины проплавления при наплавке (сварке) в углекислом газе на токе обратной полярности стыкового соединения без разделки кромок с нулевым зазором.

2. Определена и математически описана функциональная зависимость глубины проплавления от параметров режима наплавки (сварки).

3. Полученная эмпирическая формула обеспечивает наибольшую простоту и точность инженерных и научных расчетов глубины проплавления при механизированной наплавке (сварке) и позволяет проводить ее экспресс-оценку.

1. Акулов А. И., Бельчук Т. А., Демянцевич В. П. Технология и оборудование сварки плавлением. — М.: Машиностроение, 1977. — 432 с.
2. Дубовицкий С. В., Сергацкий Г. И., Касаткин О. Г. Оптимизация режима сварки в CO₂ // Автомат. сварка. — 1980. — № 12. — С. 30–35.
3. Рыкалин Н. Н., Бекетов А. И. Расчет термического цикла околошовной зоны по очертанию плоской сварочной ванны // Свароч. пр-во. — 1967. — № 9. — С. 22–25.
4. Кривошея В. Е. Моделирование процессов сварки // Автоматизация сварочного производства в свете решений XXVI съезда КПСС. — Л.: ЛДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1981. — С. 44–52.
5. Варуха Е. Н., Докторский Р. Я. Расчет скорости плавления электрода при механизированной сварке // Свароч. пр-во. — 1991. — № 6. — С. 33–35.
6. Лецицкий Л. К., Павлов И. В. Толщина жидкой прослойки под дугой при наплавке ленточным электродом и проволокой // Автомат. сварка. — 1975. — № 3. — С. 75–76.
7. Чернышев Г. Г., Рыбачук А. Н. О толщине жидкой прослойки под дугой // Технология и автоматизация процессов сварки и пайки. — М.: Машиностроение, 1969.

Поступила в редакцию 02.10.2001