

УДК 621.791.753.042.5

Гулаков С.В.¹, Ярыза-Стеценко А.В.², Бурлака В.В.³, Псарёва И.С.⁴

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛЕГИРОВАНИЕМ НАПЛАВЛЯЕМОГО МЕТАЛЛА ПЕРЕМЕННОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

На основе анализа условий легирования наплавляемого слоя переменного химического состава разработана автоматизированная система управления процессом дуговой наплавки, обеспечивающая заданное распределение химических элементов в наплавленном слое.

Реализация процесса формирования дуговой наплавкой слоя переменного химического состава возможна при условии решения задачи управления количеством легирующих элементов, подаваемых в сварочную ванну по такому закону, чтобы характер их распределения в наплавленном металле соответствовал заданной закономерности. При этом необходимо учесть их приход в ванну из электродных и присадочных материалов, основного металла и флюса с учетом буферного влияния объема сварочной ванны.

Известны математические выражения [1, 2], описывающие какое количество данного легирующего элемента, содержащегося в электродных материалах, надо подать в ванну, чтобы скомпенсировать буферное влияние ее объема в зависимости от характера изменения состава наплавляемого металла и ряда других факторов.

В реальных условиях одним из способов управления легированием наплавляемого металла является метод подачи в зону горения дуги двух разнородных по составу электродов

[3]. Изменяя соотношение скоростей их подачи $n = \frac{v_1}{v_1 + v_2}$, где v_1 и v_2 – массовые скорости

подачи каждого электрода в сварочную ванну (при этом суммарная скорость их подачи ($v_1 + v_2$) остается постоянной), можно регулировать состав формирующегося валика.

При использовании выражения, предложенного в работе [1]:

$$a_{эл}(t) = \frac{C(t) + T \cdot \frac{dC(t)}{dt} - a_0(t) \cdot \Theta}{1 - \Theta} - K_\phi \eta_\phi a_\phi \quad (1)$$

для управления процессом легирования наплавляемого слоя переменного химического состава с применением схемы подачи двух электродов различного химического состава и керамического легирующего флюса необходимо параметр $a_{эл}(t)$ выразить через соотношение скоростей подачи разнородных по химическому составу электродов – n .

Для осуществления процесса выбираем два электрода, один из которых выполнен с максимальным (a_{max}), а другой с минимальным (a_{min}) содержанием требуемого легирующего элемента, при этом (a_{max}) должно быть больше максимально необходимого количества легирующих элементов, которое нужно для формирования участка наплавляемого металла с максимальной степенью легирования, а (a_{min}) – менее минимально необходимого количества, которое требуется для формирования участка наплавляемого металла с минимальной степенью легирования.

Тогда:

$$a_{эл} = a_{max} \cdot n + a_{min} (1 - n) \quad (2)$$

или:

¹ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

²ПГТУ, аспирант

³ПГТУ, аспирант

⁴ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

$$a_{эл} = n(a_{max} - a_{min}) + a_{min}, \quad (3)$$

откуда:

$$n = \frac{a_{эл} - a_{min}}{a_{max} - a_{min}} \quad (4)$$

Решая совместно уравнения (1) и (4), получим:

$$n = \frac{C(t) + T \cdot \frac{dC(t)}{dt} - K_{\phi} \eta_{\phi} a_{\phi} - a_{min}}{a_{max} - a_{min}} \quad (5)$$

В уравнениях (1 – 5): $a_{эл}(t)$ – закон изменения во времени количества легирующего электродного материала, подаваемого в сварочную ванну;

$C(t)$ – закон распределения легирующих элементов по длине наплавленного валика;

$\frac{dC(t)}{dt}$ – градиент изменения легирующих элементов по длине наплавленного валика;

$a_0(t)$ – распределение легирующих элементов в основном металле или в предыдущем наплавленном слое;

T – осредненное по объему ванны продолжительность пребывания металла ванны в жидком состоянии;

Θ – доля участия основного металла в шве;

η_{ϕ} – коэффициент перехода легирующих элементов в шов из флюса;

a_{ϕ} – содержание легирующих элементов во флюсе;

K_{ϕ} – относительная масса флюса.

Из анализа выражения (5) видно, что при управлении легированием наплавленного валика на характер изменения состава наплавленного металла, кроме динамики его изменения, оказывают влияние время пребывания металла сварочной ванны в жидком состоянии (T) и относительная масса расплавленного флюса (K_{ϕ}). Указанные параметры, в свою очередь, могут зависеть от соотношения скоростей подачи (n) разнородных электродов, подаваемых в сварочную ванну.

Целью работы является создание автоматизированной системы управления процессом дуговой наплавки рабочего слоя переменного химического состава, обеспечивающую минимальные различия между заданным законом распределения химических элементов в наплавленном слое и реальным.

Неточности в определении параметров сварочной ванны, вычисленных с помощью теории теплопроводности, трудности в аналитическом описании процесса формирования сварочной ванны предопределяют разработку пригодных для управления процессом наплавки математических моделей на основе статистических методов. Особенности процесса наплавки слоя переменного химического состава не позволяют использовать регрессионные модели, построенные рядом авторов для специальных способов автоматической сварки.

Аналогичная ситуация имеет место в настоящее время и с аналитическим описанием условий и характера плавления флюса, что особенно важно при легировании сварочной ванны из керамических флюсов.

В связи с этим с использованием метода планирования эксперимента построены модели, описывающие влияние режимов технологического процесса на параметры сварочной ванны и условия плавления флюса, чтобы применить их для управления процессом легирования швов переменного химического состава путем изменения соотношения массовых скоростей подачи электродов в ванну при сохранении их суммарной скорости на заданном уровне [3].

План эксперимента составлен с использованием взаимно-ортогональных квадратов [4]. В исследования были включены четыре основных фактора (ток дуги – I_d , А; напряжение на дуге – U_d , В, скорость наплавки – v_n и соотношение скоростей подачи электродов в сварочную ванну – n) при определении параметров сварочной ванны (ее массы и времени существования в жидком состоянии) и три фактора (U_d , I_d и n) – при определении относительной массы расплавленного шлака K_{ϕ} , каждый из которых варьировали на пяти уровнях.

В процессе статистической обработки результатов экспериментов и исключения незначимых коэффициентов получены модели, взаимосвязывающие параметры сварочной

ванны – время существования ее в жидком состоянии – T и относительную массу расплавленного шлака – K_ϕ с режимами наплавки:

$$T = 12,12 - 0,031U - 0,075n + 6,4 \cdot 10^{-4}In - 1,8 \cdot 10^{-4}Iv_n + 6,3 \cdot 10^{-5}In - 1,4 \cdot 10^{-3}Un + 4,28v_n^2 \quad (6)$$

$$K_\phi = 3,32 - 0,16U - 9,0 \cdot 10^{-4}I - 6,0 \cdot 10^{-3}n + 3,45 \cdot 10^{-3}U^2 \quad (7)$$

Применение полученной модели в системе автоматического управления (САУ) процессом легирования позволит обеспечить соответствие реального распределения химических элементов в шве расчетному при изменении режимов наплавки в выбранном диапазоне.

Для корректного управления процессом легирования слоя переменного химического состава в соответствии с уравнением (5) необходимо решать систему уравнений (5), (6) и (7), в которой параметр n для уравнения (5) является функцией, а для уравнений (6) и (7) – аргументом:

$$\begin{cases} n = \varphi_1(C, T, K_\phi) \\ T = \varphi_2(U, I, v_n, n) \\ K_\phi = \varphi_3(U, I, n) \end{cases} \quad (8)$$

Решить поставленную задачу можно методом простой итерации (методом последовательных приближений). Учитывая, что отрезок изоляции корня (n) уравнения может изменяться в пределах от 0 до 100, приближенное начальное значение его принимается в середине отрезка, то есть на уровне 50.

Тогда в уравнения (6) и (7) первоначально подставляем значения n , равные 50. Получившиеся значения T и K_ϕ подставляем в уравнение (5) и решаем его. Определив текущее значение n в выражении (5), сравниваем его со значением n , подставленным ранее в выражения (6) и (7).

В случае невыполнения неравенства (9) с допустимой точностью – e

$$(n_p - e) \leq n \leq (n_p + e), \quad (9)$$

новое расчетное (полученное) значение n вновь подставляем в уравнение (6) и (7).

В неравенстве (9): n_p – расчетное значение соотношения скоростей подачи электродов n , а e – допустимая точность определения n .

Решаем уравнение (5) с новыми значениями T и K_ϕ и получаем очередной параметр n_p . Вычисления, таким образом, продолжаем до тех пор, пока не будет выполняться условие (9).

Такие вычисления осуществляются с заданным шагом на протяжении всей кривой, характеризующей закон распределения химических элементов по наплавляемой поверхности.

Обработка информации ведется с использованием ПК в среде Delphi, с помощью языка программирования Object Pascal. Пример работы программы представлен на рисунке 1.

Ввод данных – режимы наплавки, содержание легирующего элемента во флюсе и в электродах, а также управление программой осуществляется с помощью клавиатуры и манипулятора мыши. Точки, описывающие закон распределения легирующего элемента по наплавляемой поверхности, наносятся на область построения графика посредством щелчка левой кнопки мыши. Далее с помощью кнопки «Аппроксимировать график» строится график 1 (рис. 1).

Полученный результат в виде графика 2 выводится на экран (рис. 1).

Получившийся ряд значений n для определенного закона изменения химического состава наплавленного металла передается в ПЗУ и используется для управления процессом реального легирования с помощью разработанного устройства, описание которого приведено ниже. Для этого расчетные значения n переносятся из ПЗУ ПК во flash-память данного устройства, при работе которого производится их последовательная выборка в зависимости от положения наплавочного аппарата относительно координат наплавляемой поверхности.

Такой подход к решению данной задачи упрощает требования к доступности использования технологии в условиях производства, к быстродействию и стоимости аппаратных средств, систем управления наплавочным оборудованием.

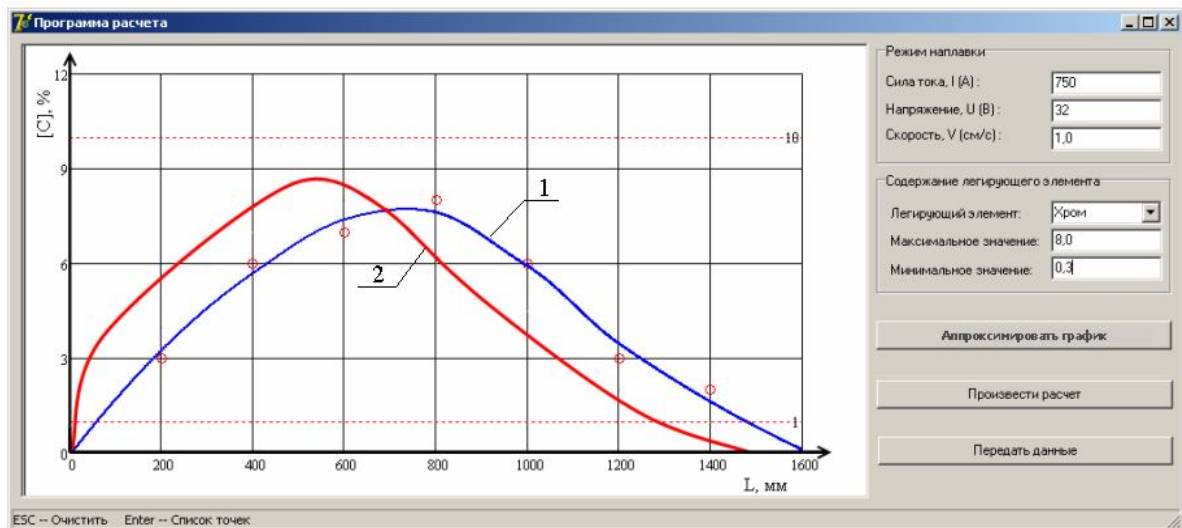


Рис. 1 – Внешний вид рабочего окна программы после проведения расчетов

Принципиальная электрическая схема разработанного устройства приведена на рис. 2.

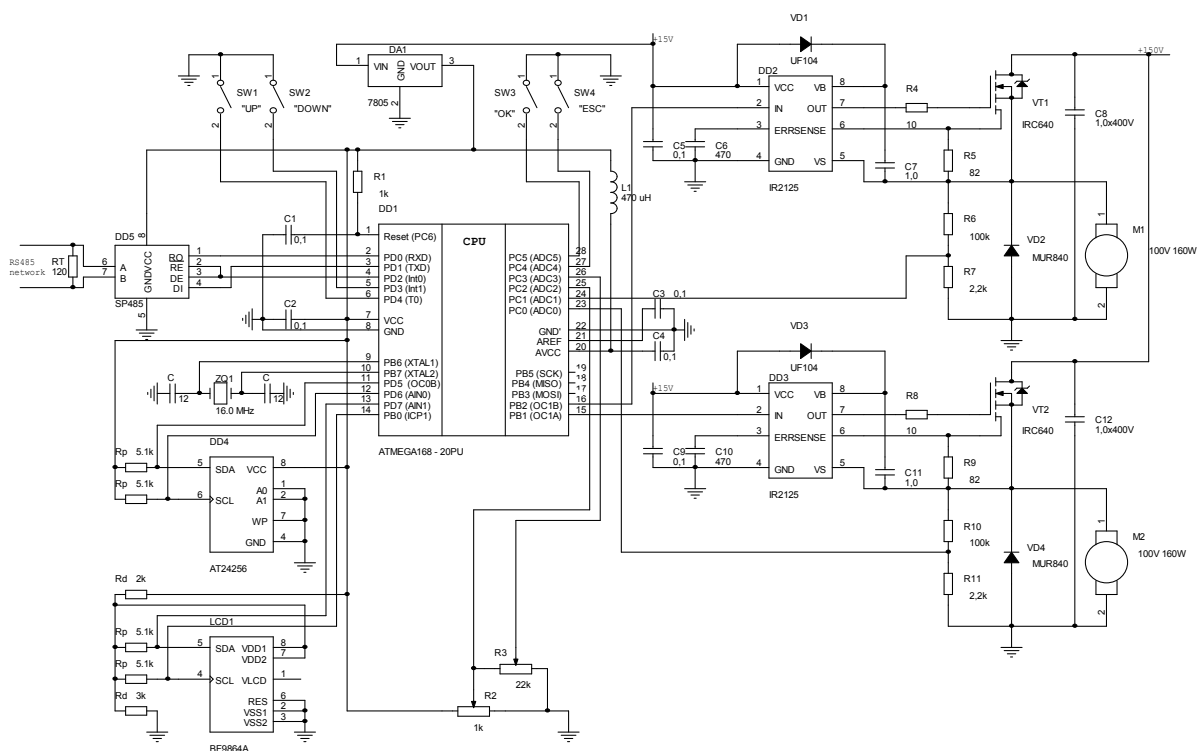


Рис. 2 – Принципиальная электрическая схема устройства

Узел управления двигателями подачи электродов выполнен на однокристальном микроконтроллере (МК). Задание скорости двигателей производится либо вручную резисторами R2, R3 через входы PC2 и PC3 МК, либо в соответствии с загруженной программой. Выбор режима работы происходит в интерактивном режиме через меню.

Для связи с ПК и загрузки управляющей программы в устройстве предусмотрен порт стандарта RS-485.

Согласование линии связи с логическими уровнями МК осуществляется приемопередатчиком DD5 типа SP485. Программа управления скоростью двигателей сохраняется в энергонезависимой Flash-памяти DD4 емкостью 32 кб.

Интерфейс с оператором образуют ЖКИ-индикатор и кнопки SW1 – SW4 с нанесенными обозначениями «вверх» (UP), «вниз» (DOWN), «OK», «ESC». На дисплее отображается интерактивное меню, через которое можно изменять настройки устройства управления.

Измерение скорости двигателей производится косвенным путем посредством измерения ЭДС вращения. Для этого каждые 20 мс производится отключение питания и измерение ЭДС якоря.

Устройство прошло опробование в работе с механизмом подачи двух электродов при управлении скоростями вращения коллекторных двигателей постоянного тока типа СЛ-661 и показало высокие служебные характеристики: диапазон стабильного регулирования скоростей вращения 1:100, нестабильность заданной скорости вращения не превышала 4 % на крайних участках диапазона регулирования, полностью отсутствовали колебания скорости вращения во всем диапазоне регулирования.

Дальнейшие разработки в данном направлении являются перспективными, так как позволяют расширить функциональные и эксплуатационные характеристики деталей машин и инструмента, обеспечивающие повышение качества выпускаемой продукции.

Выводы

1. Разработана программа, позволяющая на основании требуемого закона распределения легирующих элементов в наплавленном слое вычислять ряд значений соотношения скоростей подачи разнородных по химическому составу электродов с учетом буферного влияния сварочной ванны, ее геометрических параметров, условий перехода легирующих элементов из флюса и др. Эта информация передается на микроконтроллер, который управляет двигателями подачи электродов.
2. Учитывая, что в системе уравнений отдельные параметры (T – осредненная по объему ванны продолжительность пребывания металла ванны в жидком состоянии, K_f – относительная масса флюса, n – соотношение скоростей подачи электродов), являясь аргументом в одном уравнении системы, выступают функцией в других, для ее решения использован метод последовательных приближений.
3. С применением современной элементной базы разработана электрическая схема управления работой электродвигателей механизмов подачи электродов, в которой регулирование скоростей двигателей осуществляется путем широтно-импульсной модуляции постоянного тока, питающего обмотки их якорей. Это позволило обеспечить высокую стабильность поддержания скоростей вращения двигателей в диапазоне их изменения 1:100.

Перечень ссылок

1. Гулаков С.В. Особенности формирования сварочной ванны / С.В. Гулаков, Б.И. Носовский // Автоматическая сварка. – 1981. – № 11. – С. 32 – 35.
2. Лецинский Л.К. Расчетный метод решения задачи управления составом металла в процессе сварки (наплавки) / Л.К. Лецинский, Н.Н. Литвин // Математические методы в сварке. – 1981. – С. 42 – 46.
3. Гулаков С.В. Установка для наплавки слоя с изменяющимися свойствами / С.В. Гулаков, Л.К. Лецинский, Б.И. Носовский // Сварочное производство. – 1979. – № 7. – С. 30 – 32.
4. Протодьяконов М.М. Методика рационального планирования экспериментов / М.М. Протодьяконов, Р.И. Теде. – М.: Наука, 1970. – 76 с.

Рецензент: В.В. Чигарев
д-р техн. наук, проф., ПДТУ

Статья поступила 01.03.2009