

ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621(075.8)

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ ГЛУБИНЫ
ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ
ОТВЕТСТВЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО ОСЦИЛЛЯЦИИ СВАРОЧНОЙ
ВАННЫ

© 2019 Э.А. Гладков*, Н.А. Симакова**, Р.А. Перковский*, Т.В. Бродягина***

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ), Москва, Россия

**Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета (МИФИ), Волгодонск, Россия

***Аттестационный Центр Городского Хозяйства (АЦГХ), Москва, Россия

В статье изложены результаты исследований, выполненных для построения автоматической системы регулирования глубины проплавления при аргонодуговой сварке по сигналам о колебаниях сварочной ванны. Предложены методы контроля и алгоритмы управления процессом аргонодуговой сварки ответственных конструкций по осцилляции сварочной ванны и выделения спектра колебаний.

Ключевые слова: сварочная ванна, величина проплавления, оптический датчик, качество сварки.

Поступила в редакцию 18.12.2018

После доработки 24.01.2019

Принята к публикации 11.02.2019

При импульсно-дуговой сварке при полном проплавлении стыка сварочную ванну можно представить геометрической моделью, имеющей сферическую форму [1]. Рассмотрим случай, когда на сварочную ванну в процессе сварки действуют сила давления дуги F_d , сила тяжести F_g , сила поверхностного натяжения $F_{н.н}$ и сила вязкого трения $F_{в.т}$ (рис. 1); при выполнении условия (1) провисание сварочной ванны $z = z_0$.

Условие равновесия сварочной ванны в общем виде записывается уравнением:

$$\sum_{i=1}^N F_i = 0 \quad (1)$$

где F_i – силы, действующие на сварочную ванну.

Выражения для сил F_i имеют вид:

$$F_d = k \cdot I_d^2; F_g = m_{np} \cdot g; F_{н.н} = \frac{4 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot a^2 \cdot z_0}{a^2 + z_0^2};$$
$$F_{в.т} = 4 \cdot \pi \cdot \delta \cdot \eta \cdot \frac{(z_0^2 + a^2) \cdot a^2}{(a^2 - z_0^2)^2} \cdot v_0, \quad (2)$$

где η – коэффициент вязкого трения в слоях сварочной ванны при ее движении;

k – коэффициент пропорциональности;
 v_0 – скорость движения слоев расплавленного металла.

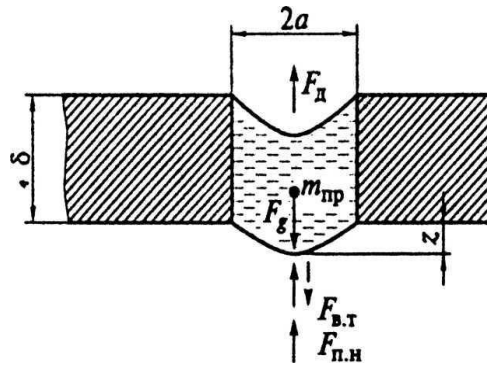


Рисунок 1 – Сферическая модель сварочной ванны: F_d – сила давления дуги; F_g – сила тяжести сварочной ванны; $F_{в.т}$ – силы вязкого трения при колебании ванны; $F_{п.н}$ – силы поверхностного натяжения с наружной и внутренней поверхности сварочной ванны; a – полуширина сварочной ванны; m_{np} – приведенная масса сварочной ванны; δ – толщина свариваемого металла; z – провисание сварочной ванны [Spherical welding pool model: F_d – arc pressure force; F_g – gravity of the welding pool; $F_{в.т}$ – viscous friction force when the bath oscillates; $F_{п.н}$ – surface tension forces from the outer and inner surfaces of the welding pool; a – half-width of the primary bath; m_{np} – reduced mass of the welding pool; δ – thickness of the metal being welded; z – sagging welding pool]

$$m_{np} = \int_S \left[\frac{z(x)}{z(x \approx 0)} \right]^2 dm. \quad (3)$$

Динамика поведения сварочной ванны при вариации действующих на нее сил определяется уравнением:

$$m_{np} \cdot z'' = \sum_{i=1}^N P_i \quad (4)$$

Используя выражения (2) и полагая, что:

$$z = z_0 \pm \Delta z; \quad I_d = I_0 \pm \Delta I \quad (5)$$

можно записать линеаризованное выражение для уравнения (4):

$$\frac{m_{np}}{2} \cdot \Delta z'' + 4 \cdot \pi \cdot \delta \cdot \eta \cdot \frac{(z_0^2 + a^2)}{(a^2 - z_0^2)^2} \cdot \Delta z = 2 \cdot k \cdot (I_0 + \Delta I) \quad (6)$$

Результат решения уравнения (6) при скачкообразном изменении сварочного тока в момент времени t_1 приведен на рисунке 2.

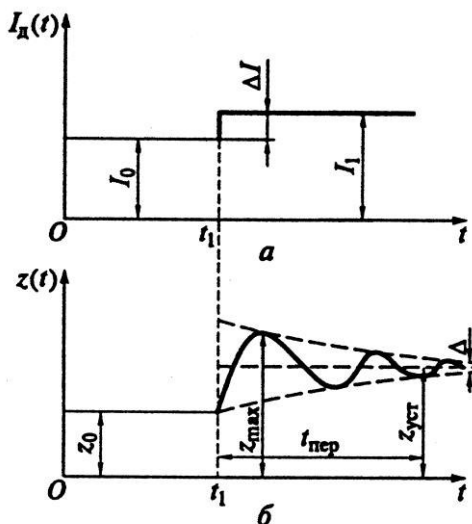


Рисунок 2 – График колебаний сварочной ванны при скачке сварочного тока в момент времени t_1 : а – закон изменения сварочного тока; б – график колебания сварочной ванны; I_0 , I_1 – сварочный ток при равновесии сварочной ванны и после скачка тока; z_0 , z_{\max} и $z_{уст}$ – провисание сварочной ванны при ее равновесии, максимальное и установившееся; $t_{пер}$ – время переходного процесса; $\Delta I = I_1 - I_0 = (0,02...0,05) \cdot z_{уст}$ [The oscillation graph of the welding pool when the welding current jumps at a time t_1 : a – is the law of welding current variation; b – graph of welding bath oscillations; I_0 , I_1 – welding current at equilibrium of the welding and after a surge current; z_0 , z_{\max} и $z_{уст}$ – sagging of the welding pool at its equilibrium, maximal and steady; $t_{пер}$ – time of transition; $\Delta I = I_1 - I_0 = (0,02...0,05) \cdot z_{уст}$]

Сварочная ванна с момента времени t_1 совершает затухающие колебания. Частота и амплитуда колебаний сварочной ванны зависят от параметров δ , η , σ , а. Легко показать, что число колебаний сварочной ванны равно:

$$n = \frac{t_{пер} \cdot \sqrt{1 - \xi^2}}{2 \cdot \pi \cdot T}, \quad (7)$$

где $\xi = \frac{\delta \cdot \eta \cdot (a^2 + z_0^2) \cdot a}{\sqrt{\frac{m \cdot \sigma}{\pi} \cdot (a^2 - z_0^2)^5}}$ – коэффициент демпфирования;

$$T = \frac{a^2 + z_0^2}{4 \cdot a} \cdot \sqrt{\frac{m}{\pi \cdot \sigma \cdot (a^2 - z_0^2)}} \quad \text{– постоянная времени; } m = 2 \cdot m_{np}.$$

Принцип работы системы контроля проплавления стыка с использованием информации о колебаниях сварочной ванны заключается в воздействии на сварочную ванну кратковременных (несколько миллисекунд) импульсов тока. Частота и амплитуда колебаний сварочной ванны зависят от ее массы. Масса сварочной ванны функционально связана с глубиной проплавления стыка. Случай неполного проплавления стыка соответствует сварочной ванне с малой массой. При воздействии импульсом тока в ней возникают свободные колебания малой амплитуды и большой частоты. При полном проплавлении стыка сварочная ванна имеет большую массу, и после воздействия кратковременного импульса тока в ней возникают затухающие колебания с большой амплитудой и меньшей частотой. На практике, когда имеет место

переход от непровара стыка к полному проплавлению, частота колебаний сварочной ванны ступенчато изменяется в пределах от 150 до 50 Гц (рис. 3). Контроль изменения частоты колебаний сварочной ванны позволяет получить информацию о качестве формирования шва в процессе сварки.

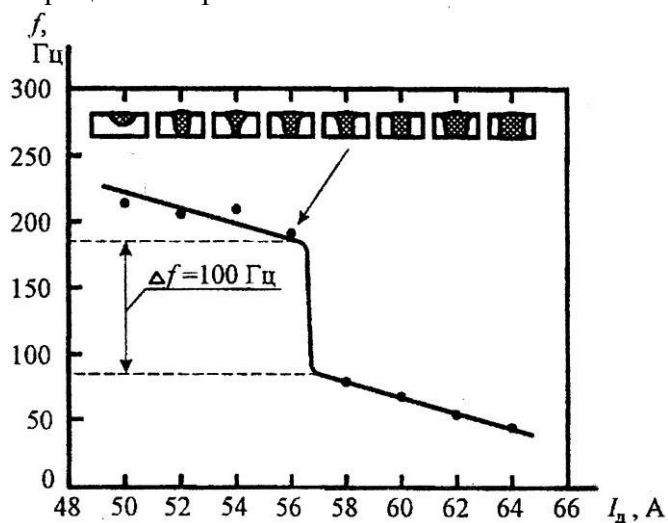


Рисунок 3 – График изменения частоты колебаний сварочной ванны при изменении глубины проплавления стыка в зависимости от изменения тока дежурной дуги [The graph of the variation of the oscillation frequency of the welding pool with a change in the depth of penetration of the joint versus the change in the current of the pilot arc]

Осциллограммы напряжений на рисунке 4 отражают информацию о колебаниях внешнего зеркала сварочной ванны при воздействии импульса тока с амплитудой I_n . Изменение напряжения дуги при переходном процессе вызвано изменением длины дуги из-за колебания поверхности сварочной ванны [2].

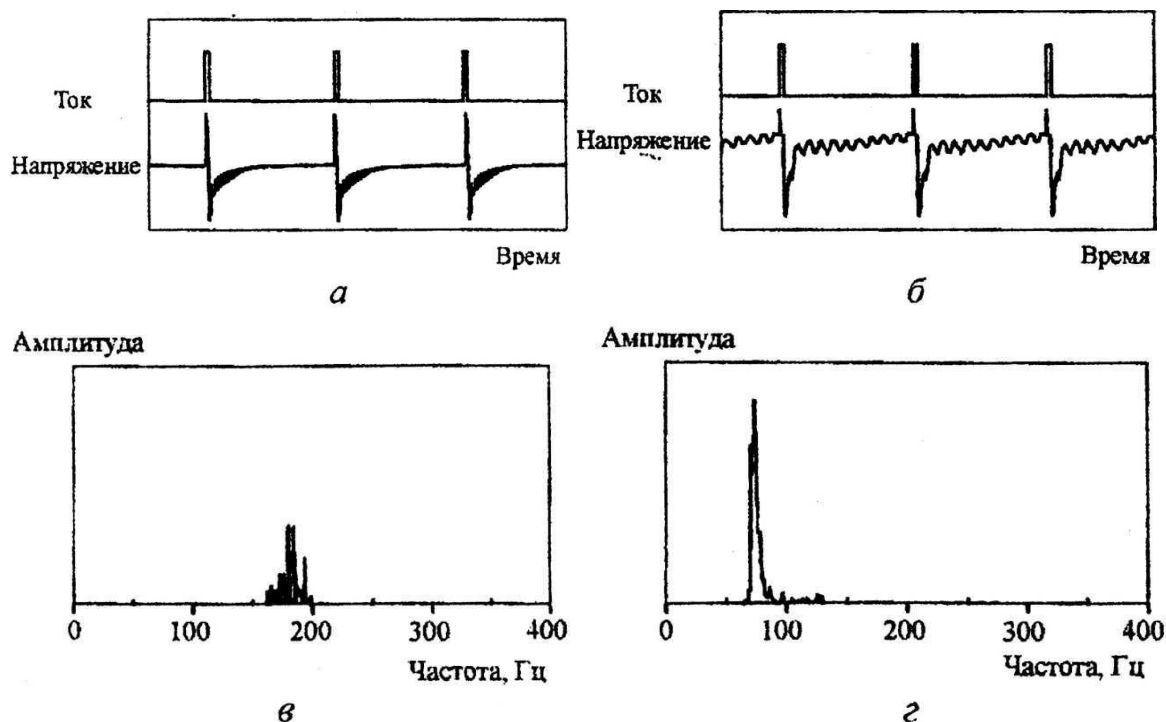


Рисунок 4 – Осциллограммы тока и напряжения (а, б) и соответствующий им частотный спектр колебаний сварочной ванны для случаев неполного проплавления стыка (в) и полного проплавления стыка (г) [Oscillograms of current and voltage (a, b) and the corresponding frequency spectrum of welding pool oscillations for cases of incomplete penetration of the joint (c) and complete penetration of the joint (d)]

Чувствительность системы по напряжению дуги к колебаниям поверхностного слоя сварочной ванны выше при ведении процесса сварки на короткой дуге. Для выделения колебаний напряжения при воздействии на сварочную ванну каждого импульса используется разностный сигнал между текущими и номинальными значениями напряжений дуги (принцип компенсации) (рис. 5).

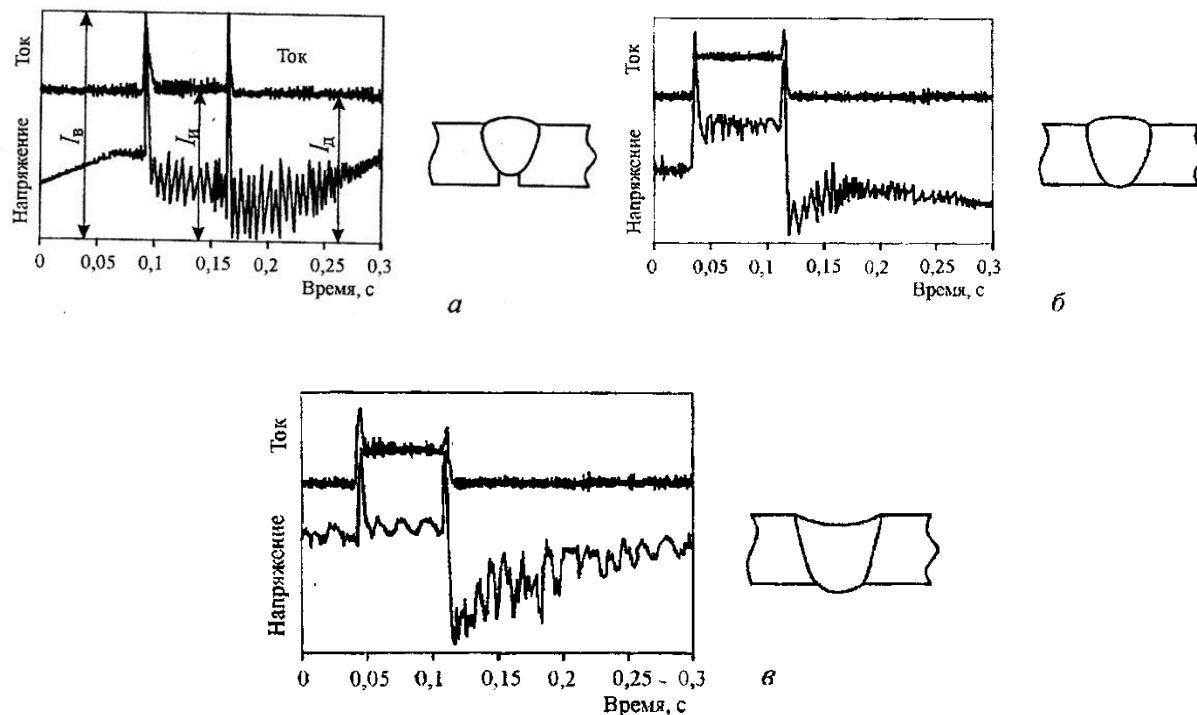


Рисунок 5 – Осциллограммы тока и напряжения при импульсно-дуговой сварке с дополнительными кратковременными импульсами возбуждения, колебаний сварочной ванны: а – неполное проплавление стыка (непровар); б – нормальное проплавление стыка; в – полное проплавление стыка с провисанием шва (случай, близкий к прожогу) [Oscillograms of current and voltage during pulsed arc welding with additional short-term excitation pulses, welding pool oscillations: a – incomplete penetration of the joint (lack of welding) b – normal penetration of the joint; c – complete penetration of the joint with sagging of the seam (a case close to the burn-through)]

Для повышения чувствительности к изменению проплавления стыка на рабочие импульсы тока и напряжения от источника питания дуги накладывают кратковременные (несколько миллисекунд) импульсы, не влияющие на проплавляющую способность дуги, но повышающие колебательный характер сварочной ванны, – так называемые импульсы возбуждения.

Недостатком способа контроля глубины проплавления являются малые изменения напряжения дуги (не более 0,5 В) при колебании поверхности сварочной ванны. Для надежного детектирования малых изменений напряжения дуги следует проводить сварку со стабилизированным источником питания дуги на минимальном напряжении дуги (короткая длина дуги), и лучше в среде гелия. Чувствительность способа изменяется при переходе на сварку в различных пространственных положениях.

Другой способ индикации колебаний сварочной ванны, который оказался более надежным на практике, заключается в использовании фотодиодных оптических устройств [3, 4].

1) Оптический датчик. Для измерения колебаний сварочной ванны в системе контроля используется принцип оптического обнаружения. Данная технология измерения придает системе большую надежность и простоту применения. Сварочная

ванна имеет блестящую (зеркальную) поверхность, форма которой по мере колебаний изменяется, модулируя отраженный свет дуги. Данная модуляция состоит из двух эффектов: модуляции из-за изменения скрытой составляющей длины дуги и изменения формы сварочной ванны, которая действует как зеркало. Если поместить входной объектив оптического волокна для сбора части модулированного света вблизи зоны сварки и передать по нему излучение на фотодиод (рис. 6), то электрический сигнал от фотодиода будет содержать информацию о частоте колебания сварочной ванны. Сигналы, полученные таким образом, имеют низкие уровни помех. Колебания сварочной ванны формируют на выходе фотодиода четкий электрический сигнал, который впоследствии анализируется с помощью компьютера.

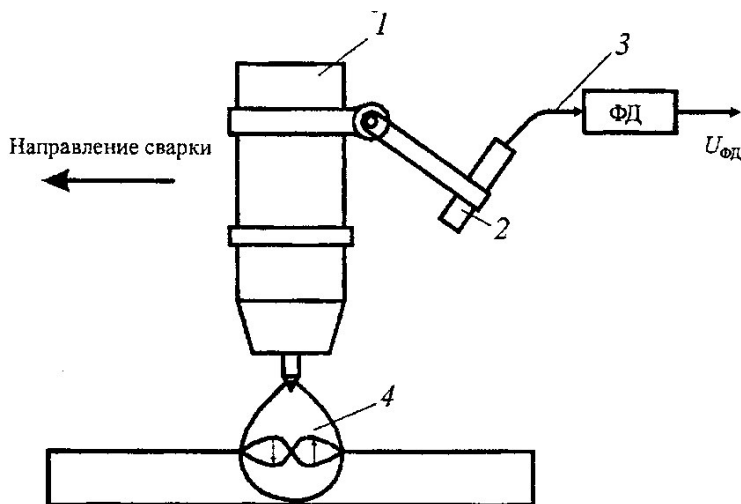


Рисунок 6 – Схема установки оптического датчика на сварочной горелке: 1 – сварочная горелка; 2 – объектив; 3 – оптическое волокно; 4 – поверхность сварочной ванны [Installation scheme of the optical sensor on the welding torch: 1 – welding torch; 2 – lens; 3 – optical fiber; 4 – surface of the welding pool]

Реализация сигнала с фотодиода и его спектр для случая неполного проплавления стыка (непровара) показаны на рисунке 7.

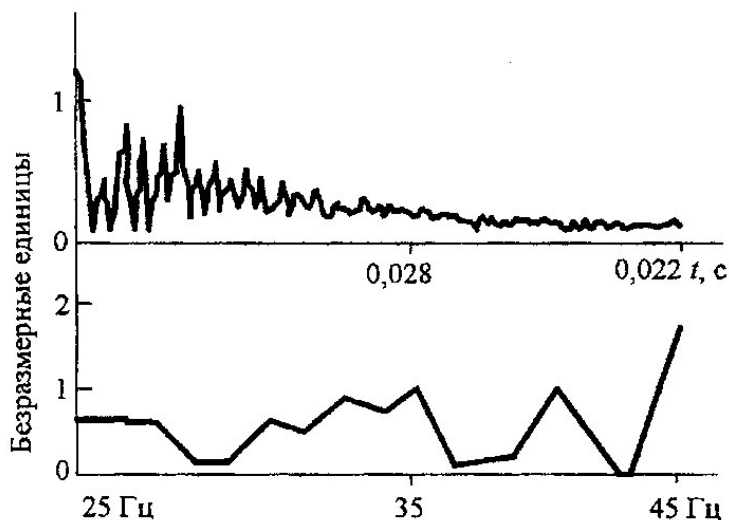


Рисунок 7 – Временной и частотный графики по осцилляции сварочной ванны при неполном проплавлении, полученные при обработке сигнала на выходе оптического датчика [Time and frequency charts for the oscillation of the welding pool with incomplete penetration, obtained by processing the signal at the output of the optical sensor]

2) Информация о частоте колебаний сварочной ванны, присутствующая в сигнале от фотодиода, определяется преобразованием Фурье с помощью специального программного обеспечения [5].

Примеры спектра Фурье, полученные для двух типичных реализаций (полного и неполного проплавления стыка), показаны на рисунках 4 и 5. Преобразование осуществляется с помощью технологии быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Определив частоту колебаний сварочной ванны, система контроля проплавления стыка вырабатывает соответствующее корректирующее воздействие. Желаемое значение частоты в герцах получают простым расчетом по формуле (8):

$$f = \sqrt{\frac{\sigma_x \cdot const}{m}} \quad (8)$$

где t – масса ванны;

σ_x – поверхностное натяжение материала;

константа формы для реальных сварочных ванн приблизительно равна единице.

Из уравнения (8) ясно, что чем больше масса ванны, тем ниже частота ее колебаний. Следовательно, если требуется выполнить сварку с полным проплавлением, нужна сварочная ванна большей массы. Согласно формуле (8) частота колебаний такой ванны будет снижена. Массу сварочной ванны можно оценить по формуле (9):

$$m \approx \frac{\rho \cdot h \cdot \pi \cdot d^2}{4}, \quad (9)$$

где ρ – плотность;

h – толщина свариваемого материала;

d – диаметр сварочной ванны.

С учетом уравнения (9) формула (8) будет иметь вид:

$$f = \frac{2}{d} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_x}{\pi \cdot \rho \cdot h}} \quad (10)$$

При импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом с полным проплавлением стыкового соединения из аустенитной стали при $\rho = 8000 \text{ кг/м}^3$ и $\sigma_x = 1$ формула (10) примет вид:

$$f = \frac{0,0126}{d \cdot \sqrt{h}}.$$

Для шва шириной 7 мм и толщиной пластины $h = 3$ мм расчетная частота колебаний сварочной ванны составляет $f = 31$ Гц.

Функциональна схема системы управления проплавлением стыка по осцилляции сварочной ванны приведена на рисунке 8.

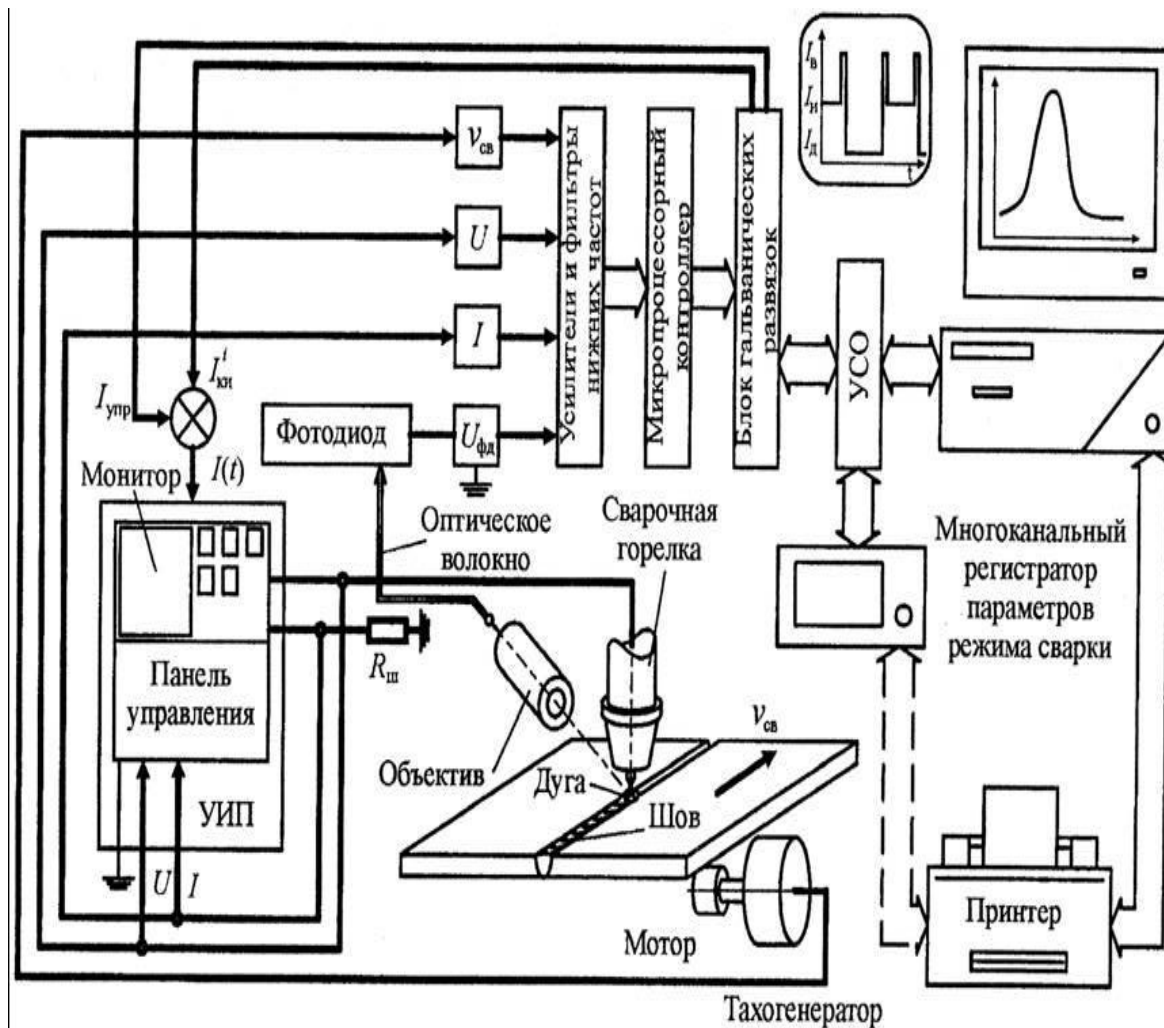


Рисунок 8 – Функциональная схема системы управления проплавлением по осцилляции сварочной ванны [Functional diagram of the penetration control system for welding pool oscillation]

В системе для реализации импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом используется инверторный управляемый источник питания (УИП), обеспечивающий стабилизацию параметров тока и напряжения на уровне заданных уставок через панель управления или от компьютера. Колебания сварочной ванны в каждом цикле импульсно-дуговой сварки вызываются кратковременными импульсами возбуждения длительностью 2...3 мс, накладываемыми на рабочий импульс в начале и конце его действия в каждом цикле сварки (рис. 9). Информация о колебаниях сварочной ванны снимается оптическими или электрическими (по напряжению дуги) датчиками. Схема обработки сигналов в системе управления включает следующие этапы:

- фильтрацию сигналов с помощью низкочастотного фильтра [6];
- защиту схемы преобразования сигнала от мощной аддитивной помехи с помощью блока гальванической развязки в цифровой и аналоговой частях системы [7];
- оцифровку сигналов и передачу их через устройство связи с объектом (УСО) для частотной обработки в компьютере [8];
- частотную обработку сигналов по программе обработки информационного сигнала с использованием БПФ [9].

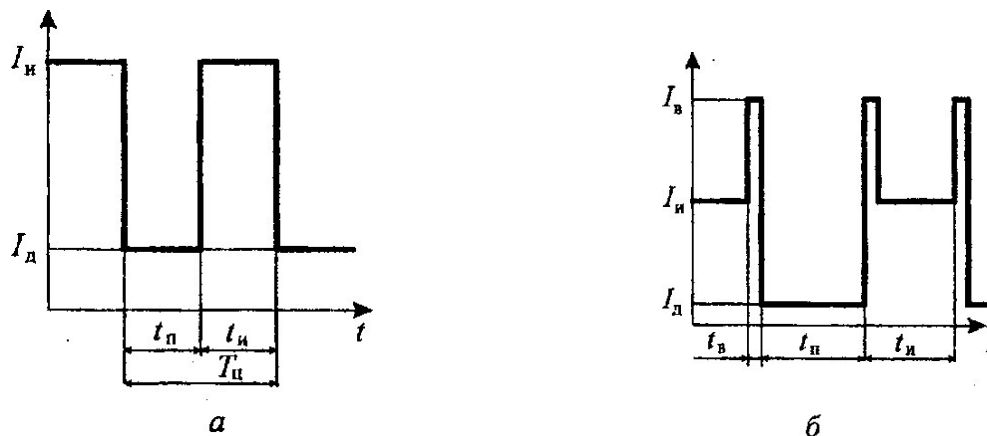


Рисунок 9 – Форма импульсов при импульсно-дуговой сварке: а – рабочий импульс (I_n , t_n); б – импульс возбуждения (I_b , t_b), наложенный на начало рабочего импульса [Pulse shape during pulsed arc welding: a – working impulse (I_n , t_n); b – excitation pulse (I_b , t_b), imposed on the beginning of the working pulse]

В структуру системы автоматического управления помимо компьютера с набором специальных периферийных устройств (принтер, дисплей, мышь) входят усилительные, измерительные и преобразовательные устройства типа АЦП, ЦАП, многоканальный цифровой регистратор основных параметров сварки (импульсного тока, напряжения дуги, скорости сварки, сигнала от фотодиода), формирующий паспорт на технологический процесс [10]. Записанные в регистраторе в цифровом виде данные о параметрах процесса сварки в автономном режиме (без компьютера) при необходимости могут быть распечатаны на принтере или в режиме off-line обработаны на компьютере.

Система управления по программе БПФ вычисляет амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) колебаний сварочной ванны в период действия каждого импульса сварки и импульса паузы по сигналу с оптического датчика или электрического датчика (рис. 10).

Качество провара	Рабочий импульс (I_n , t_n)	Импульс паузы (I_d , t_d)	Схема провара
Непровар стыка (А)			
Нормальное формирование (С)			
Прожог (чрезмерное проплавление) (В)			

Рисунок 10 – Определение качества сварки по идентификации АЧХ колебаний сварочной ванны в периоды импульса и паузы в γ -м цикле сварки [Determination of the quality of welding by identifying the frequency response of the welding pool oscillations during periods of impulse and pause in the welding cycle]

Частотный анализ положения пика АЧХ колебаний сварочной ванны в период действия импульса и паузы на каждом i -м цикле сварки в соответствии с таблицей качества сварки (рис. 10) позволяет формировать корректирующий сигнал управления по току $I_{ки}^i$ сварочного импульса [11]. Определенные значения $I_{ки}^i$ используют для стабилизации глубины проплавления стыка при действии в процессе сварки технологических возмущений [12, 13].

Алгоритм работы компьютерной системы управления в реальном времени (за каждый цикл сварки) приведен на рисунке 11.

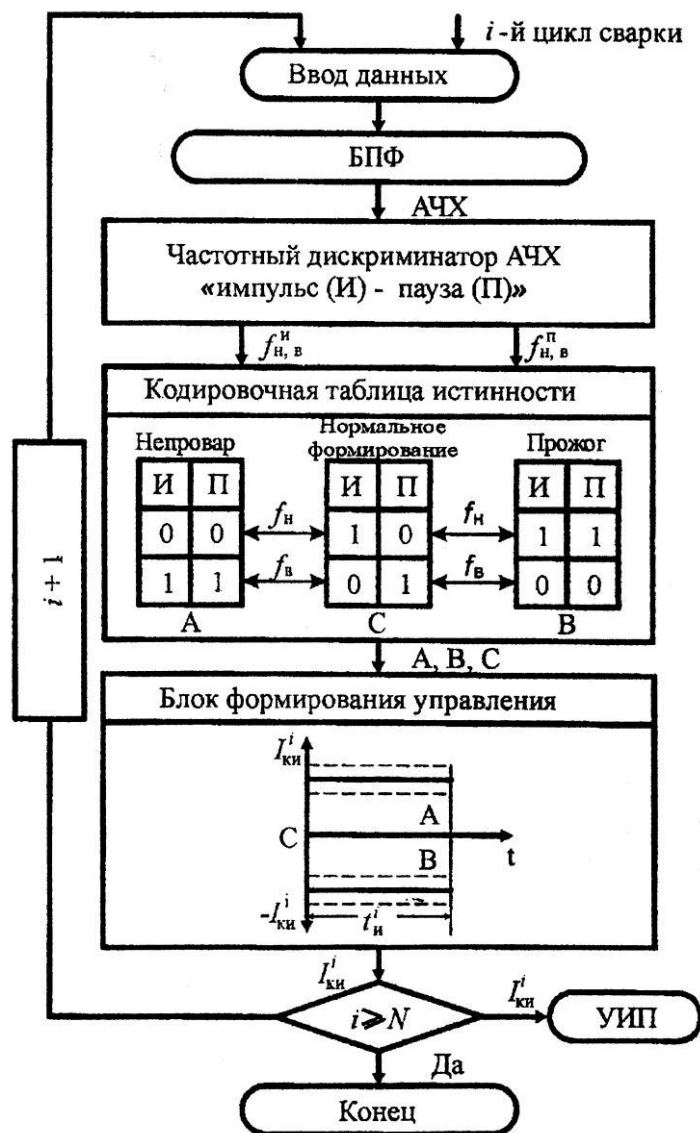


Рисунок 11 – Алгоритм обработки данных в компьютерной системе управления проплавлением [Algorithm of data processing in computer control system of penetration]

Таким образом, по результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований предложены методы и алгоритмы построения систем автоматического управления процессом аргодуговой сварки, в основу которых заложена зависимость спектра колебаний сварочной ванны с величиной проплавления свариваемого изделия. Система управления может быть рекомендована при производстве конструкций ответственного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гладков, Э.А.* Описание динамических процессов в сварочной ванне при вариации действующей нагрузки [Текст] / Э.А. Гладков, И.А. Гуслистов, А.В. Сас // Сварочное производство. – 1974. – № 4. – С. 11-13.
2. *Ишанин, Г.Г.* Источники и приемники излучения [Текст] / Г.Г. Ишанин, Э.Д. Панков, А.Л. Андреев и др. – Санкт-Петербург : Политехника, 1991. – 240 с.
3. *Гуслистов, И.А.* Устройство для контроля величины проплавления при сварке нержавеющей труб на станках АДС / И.А. Гуслистов, Э.А. Гладков, Е.М. Кричевский [и др.] // Сварочное производство. – 1973. – № 2. – С. 46-47.
4. *Ширковский, Н.А.* Адаптивная АСУ процесса аргонодуговой сварки труб [Текст] / Н.А. Ширковский, Э.А. Гладков, О.Н. Киселев [и др.] // Сварочное производство. – 1986. – №1. – С. 1-3.
5. *Гладков, Э.А.* Комплекс технических средств и оценка эффективности функционирования АСУ процесса аргонодуговой сварки труб [Текст] / Э.А. Гладков, Н.А. Ширковский, О.Н. Киселев [и др.] // Сварочное производство. – 1989. – №11. – С. 3-5.
6. *Гладков, Э.А.* Датчик величины проплавления при сварке трубчатых изделий [Текст] / Э.А. Гладков, Р.А. Перковский, О.Н. Киселев [и др.] // Перспективные пути развития сварки и контроля. Сварка и контроль 2001 : Тез. докл. всерос. науч.-техн. конф. – Воронеж, 2001 – 34 с.
7. *Смилянский, Г.Л.* Справочник проектировщика АСУ ТП [Текст] / Г.Л. Смилянский, Л.З. Амлинский, В.Я. Баранов [и др.] ; под ред. Г.Л. Смилянского. – Москва : Машиностроение, 1983. – 527 с.
8. *Виноградов, В.А.* Исследование оптического излучения сварочной дуги в аргоне [Текст] / В.А. Виноградов, Е.И. Романенков // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Сварочное производство. – 1977. – Вып. 3. – С. 184-190.
9. *Виноградов, В.А.* Возможность контроля и регулирования энерговложения в изделие при сварке концентрированными источниками нагрева с помощью оптических методов [Текст] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Сварочное производство. – 1982. – Вып. 3. – С. 91-94.
10. *Поскачей, А.А.* Оптико-электронные системы измерения температуры [Текст] / А.А. Поскачей, Е.П. Чубаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.
11. *Watkins, P.V.C., Collier, R., Harvey, D.* Pulsed arc TIG Welding. *Welding Review International*. 1993. Vol. 62. N 2. P. 29-32.
12. *Chin, W., Chin, B.* Monitoring joint penetration using infrared sensing techniques. *Welding Journal*. 1990. Vol. 69. N 4. P. 181-185.
13. *Salter, R., Deam, R.* A practical front face penetration control system for TIG welding. *Automated and Robotic Welding*. 1987 Vol. 60. N 11. P. 145-156.

REFERENCES

- [1] Gladkov E.A., Guslistov I.A., Sas A.V. Opisaniye dinamicheskikh processov v svarochnoy vanne pri variacii dejstvuyushchej na gruzki [Description of Dynamic Processes in the Weld Pool with Variations in the Current Load]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production]. 1974. № 4. P. 11-13 (in Russian).
- [2] Ishanin G.G., Pankov Eh.D., Andreev A.L. Istochniki i priemniki izlucheniya [Radiation Sources and Receivers]. SPb Politehnika [St. Petersburg: Polytechnic]. 1991 (in Russian).
- [3] Guslistov I.A., Gladkov Eh.A., Krichevskij E.M. Ustrojstvo dlya kontrolya velichiny proplavleniya pri svarke nerzhaveyushchih trub na stanah ADS [A Device for Controlling the Magnitude of Penetration in Welding of Stainless Steel Tubes at Mills ADS]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding Production]. 1973. №2. P. 46-47 (in Russian).
- [4] Shirkovskij N.A., Gladkov Eh.A., Kiselev O.N. Adaptivnaya ASU processa argonodugovoj svarki trub [Adaptive Automatic Control System of the Process Of Argon-Arc Welding Pipe]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding Production]. 1986. №11. P. 1-3 (in Russian).
- [5] Gladkov Eh.A., Shirkovskij, Kiselev O.N. i dr. Kompleks tekhnicheskikh sredstv i ocenka ehffektivnosti funkcionirovaniya N.A. ASU processa argonodugovoj svarki trub [Set of Technical Tools and Evaluation of Efficiency of Functioning of Automated Control System of the Process of Argon-Arc Welding Pipe]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding Production]. 1989. №11 P. 3-5 (in Russian).
- [6] Gladkov Eh.A., Perkovskij R.A., Kiselev O.N. Datchik velichiny proplavleniya pri svarke

- trubchatyh izdelij [Sensor of Penetration Value at Welding of Tubular Products]. Perspektivnye puti razvitiya svarki i kontrolya Svarka i control 2001. Tez dokl Vseros nauch-tekhnikonf [Perspective Ways of Development of Welding and Control. Welding and Control 2001 : abstracts of All-Russian Science Technical Conference]. Voronezh. 2001. P. 34 (in Russian).
- [7] Smilyanskij G.L., Amlinskij L.Z., Baranov V.Ya. Spravochnik proektirovshchika ASU TP [Handbook of the APCS designer]. Pod red. G. L. Smilyanskogo. M: Mashinostroenie. 1983. P. 527 (in Russian).
- [8] Vinogradov V.A., Romanenkov E.I. Issledovanie opticheskogo izlucheniya svarochnoj dugi v argone [Investigation of Optical Radiation of Welding Arc in Argon]. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser Svarochnoe proizvodstvo [Issues of Nuclear Science And Technology. Welding Production]. 1977. Vol. №3. P. 184-190 (in Russian).
- [9] Vinogradov V.A. Vozmozhnost kontrolya i regulirovaniya ehnergo vlozheniya v izdelie pri svarke koncentrirovannymi istochnikami nagreva s pomoshchyu opticheskikh metodov [The Ability to Control and Regulate the Energy Input into the Product When Welding with Concentrated Heating Sources Using Optical Methods]. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser Svarochnoe proizvodstvo [Issues of Nuclear Science And Technology. Welding Production]. 1982. Vol. 3. P. 91-94 (in Russian).
- [10] Poskachej A.A., Chubarov E.P. Optiko-ehlektronnye sistemy izmereniya temperatury [Optical-Electronic System for Measuring Temperature]. 2-e izd. Pererab. i dop. Moskva: Energoatomizdat [Moscow: Energoatomizdat]. 1988. P. 248 (in Russian).
- [11] Watkins P.V.C., Collier R., Harvey D. Pulsed arc TIG Welding. Welding Review International. 1993. Vol. 62. N 2. P. 29-32.
- [12] Chin W., Chin B. Monitoring joint penetration using infrared sensing techniques. Welding Journal. 1990. Vol. 69. N 4. P. 181-185.
- [13] Salter R., Deam R. A practical front face penetration control system for TIG welding. Automated and Robotic Welding. 1987 Vol. 60. N 11. P. 145-156.

Monitoring and Regulation System of Penetration Depth at Argon-Arc Welding of Important Products on Welding Pool Oscillation

Eh.A. Gladkov^{*1}, N.A. Simakova^{2}, R.A. Perkovskij^{*3}, T.V. Brodyagina^{***4}**

** Bauman Moscow State Technical University (MSTU), 2nd Baumanskaya St., 5, Moscow, Russia, 105005*

¹ ORCID iD: 0000-0101-6610-8725

WoS Researcher ID: J-6791-2017

e-mail: 123777@bk.ru

³ ORCID iD: 0000-0002-7512-4687

WoS Researcher ID: J-7170-2017

e-mail: proman@bmstu.ru

*** Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI", Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia, 347360*

² ORCID iD: 0000-0002-8599-6008

WoS Researcher ID: Y-3656-2018

e-mail: simnataalex@gmail.com

**** Certification Center of Urban Farming (TSGH), Perevedenovskiy lane, 13, building 15, Moscow, 105082*

⁴ ORCID iD: 0000-0002-8609-3687

WoS Researcher ID: P-2357-20

e-mail: ac-mosgaz@yandex.ru

Abstract – The article presents the results of studies carried out to build an automatic system for regulating the depth of penetration during argon-arc welding using signals of welding pool oscillations. Methods of control and algorithms for controlling the process of argon-arc welding of critical structures by welding pool oscillations and extraction of the oscillation spectrum are proposed.

Keywords: welding pool, the amount of penetration, optical sensor, welding quality.