УДК 621.314.572:621.791.037

EDN ICGBYC

УПРАВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ПРИ ЭЛЕКТРОСВАРКЕ ТРУБ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

В.С. Савчук

ORCID: 0000-0002-2281-6612 e-mail: vladsava1997@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева Нижний Новгород, Россия

А.С. Плехов

ORCID: 0000-0002-6954-3295 e-mail: aplehov@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева Нижний Новгород, Россия

Е.А. Чернов

e-mail: epa@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева Нижний Новгород, Россия

Представлены концепции учета и компенсации возникающих воздействий при автоматической дуговой сварке труб. Рассмотрен способ управления напряжением дуги и сварочным током для формирования непрерывного сварочного шва. Показана необходимость учета распределения тепловой энергии в металле в зависимости от глубины сварочной ванны и времени остывания, а также управления тепловложением из-за эффекта Баушингера. Приведены значения сил, действующих на каплю расплава при круговом движении сварочной головки и скорректированные значения мощности импульса дуги. Результаты предназначены для использования в алгоритме управляющей ЭВМ.

Ключевые слова: сварочный аппарат, электрическая дуга, зона термического воздействия, тепломассоперенос, источник питания.

Для цитирования: Савчук В.С., Плехов А.С., Чернов Е.А. Управление источником питания электрической дуги при электросварке труб высокого давления // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 2. С. 56-70. EDN ICGBYC

CONTROL OF ELECTRIC ARC POWER SUPPLY IN HIGH-PRESSURE PIPE WELDING

V.S. Savchuk

ORCID: 0000-0002-2281-6612 e-mail: vladsava1997@mail.ru Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev Nizhny Novgorod, Russia

A.S. Plekhov

ORCID: 0000-0002-6954-3295 e-mail: aplehov@mail.ru Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev Nizhny Novgorod, Russia

E.A. Chernov

e-mail: **epa@nntu.ru** Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev *Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The article presents the principles of accounting and compliance with the rules for the occurrence of impacts during automatic arc welding of pipes. A method for controlling arc voltage and welding current to form a continuous weld is considered. It is necessary to take into account the distribution of thermal energy in the metal depending on the depth of the weld pool and the cooling time, and also to control the heat input due to the Bauschinger effect. The values of the forces acting on the melt drop during the circular movement of the welding head and the corrected values of the arc pulse power are presented. The results are intended for use in the control computer algorithm.

Keywords: welding machine, electric arc, heat-affected zone, heat and mass transfer, power source.

For citation: V.S. Savchuk, A.S. Plekhov and E.A. Chernov, "Control of electric arc power supply in high-pressure pipe welding", *Smart Electrical Engineering*, no. 2, pp. 56-70, 2025. EDN ICGBYC

І. Введение

Электросварка в целом и труб в частности – это один из наиболее распространенных методов соединения металлических труб, который используется при строительстве магистральных трубопроводов, газопроводов, нефтепроводов и других объектов трубопроводного транспорта. Электросварка труб высокого давления должна обеспечить высокую прочность и герметичность сварного шва при эксплуатации в агрессивных средах и высоких давлениях. Одной из ключевых операций при электросварке труб является формирование электрической дуги, которая непрерывно поддерживает тепловой режим плавления металла [1].

II. Расчет необходимой энергии для формирования дуги

Необходимое тепло *Q*, Дж для расплава капли сварочного металла определяется:

$$Q = P \cdot T = m_{\rm so} \cdot c_{\rm so} \cdot \theta_{\rm so} + (m_{\rm so} + m_{\rm so})\gamma + + m_{\rm sg} \cdot c_{\rm sg} \cdot \theta_{\rm so} + \gamma_{\rm s} (\theta_{\rm so} [Q_{\rm c}] + \gamma_{\rm g} (\theta_{\rm so} - Q_{\rm cp})),$$
(1)

где $P_{\rm HM}$ – мощность импульса, Вт; $T_{\rm HM}$ – время импульса, с; m_{κ_3} – масса капли, кг; c_{κ_3} – удельная теплоемкость металла; θ_{κ_3} – температура плавления электродного металла, С; m_{30} – масса активного пятна, кг; γ – удельная теплота плавления капли и активного пятна; m_{3q} – масса дуги (пренебрегаемая в виду незначительной величины), кг; c_{3q} – удельная теплоемкость дуги; θ_{30} – температура плавления активного пятна, С⁰; γ_3 – условная температура электрической дуги, С; Q_c – среднее значение воздействия теплоты дуги, Дж; γ_{∂} – теплоемкость активного пятна, Дж; $Q_{\rm cp}$ – теплота рассеяния в окружающую среду, Дж; $\theta_{\kappa_3} = \theta_{\kappa_3}$ ($Q_{\rm c}$).

Значительное повышение сварочного тока приводит к повышению напряжения на дуге, так как с ростом плотности тока катодное пятно более не растет, потому что занимает всю площадь торца электрода и электрическое сопротивление дуги возрастает. При сварке в среде защитных газов используется дуга на возрастающем участке вольтамперной характеристики. Сварочная дуга обладает свойством саморегулирования, заключающимся в том, что в процессе сварки плавящимся электродом с постоянной скоростью его подачи длина дуги, при случайных ее изменениях, само восстанавливается за счет изменения скорости плавления электрода. При автоматической сварке под флюсом с постоянной скоростью подачи электродной проволоки, не зависящей от напряжения на дуге, применяют источник питания с жесткой статической вольтамперной характеристикой, работающий как регулятор напряжения, обеспечивая саморегулирование длины сварочной дуги.

При дуговой сварке плавящимся электродом происходит процесс переноса электродного металла в сварочную ванну. Капли расплавленного металла, отрываясь от электрода, периодически замыкают дуговой промежуток, изменяя силу тока и напряжение на дуге. Во время горения дуги образуется и растет капля расплавленного металла, затем при контакте между каплей и ванной происходит короткое замыкание и напряжение на дуге падает до нуля, а сила тока возрастает до максимального значения, что приводит к мгновенному сжатию шейки капли и разрушению мостика между каплей и электродом. В дальнейшем напряжение мгновенно возрастает, и сварочная дуга вновь возбуждается, после чего цикл сварки повторяется [2].

Необходимое тепло для формирования и переноса капли сварочного металла формируется в цикле, состоящем из семи тактов, показанных на рис. 1.



Рис. 1. Эталонные формы кривых сварочного тока и напряжения

Fig. 1. Reference shapes of welding current and voltage curves

На каждом такте должны быть определенные уровни напряжения дуги и тока, что позволяет формировать заданное значение мощности нагрева электродного металла и активного пятна [1]. При этом обеспечиваются следующие процессы: *T*7-*T*0-*T*1 – подготовка капли в периоде времени; *T*1-*T*2 – начальный период короткого замыкания; *T*2-*T*3 – период возникновение сил переноса электродного металла; *T*5-*T*6 – рост капли; *T*6-*T*7 – переход на базовый ток.

III. Управление инвертором для формирования кривых сварочного тока и напряжения

Процесс расплавления и массопереноса обеспечивается сварочным инвертором [3], принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 2. Схема содержит управляющий блок инвертора, который включает в себя программируемое устройство управления (ПУУ) с обратной связью по сигналам датчика напряжения (ДН) и датчика тока (ДТ); ДЧПКД – делитель частоты с переменным коэффициентом деления; Д1 и Д2 - драйверы для транзисторных ключей; F1 и F2 – формирователи тактовых импульсов. Силовая часть содержит входной выпрямитель;*L-C*фильтр;транзисторные ключи*VT*1 -*VT*4 двойного несимметричного мостового инвертора; высокочастотный трансформатор; выпрямитель на выходе; сглаживающий фильтр. Такая схема позволяет исключить «мертвое» времямежду импульсами тока в условиях непрерывного контроля параметровэлектрической дуги [4].



Рис. 2. Принципиальная электрическая схема сварочного инвертора Fig. 2. Schematic electrical diagram of a welding inverter

Формирователи F1 и F2 определяют временные диаграммы кривых сварочного тока и напряжения. В периоды, когда RS-триггер дает разрешение на включение инвертора, на драйверы Д1 и Д2 поступают импульсы с частотой $f_2/2$. Для регулирования напряжения дуги на входах драйверов Д1 и Д2 устанавливаются устройства широтно-импульсной модуляции, не показанные на данной схеме.

Фактические осциллограммы тока и напряжения, синхронизированные с фотографиями дуги на разных этапах формирования капли, сняты на экспериментальном оборудовании высокочастотной камерой со скоростью 3000 кадр/с. На рис. 3 поэтапно изображен процесс горения дуги в течении одного цикла с разбивкой на кадры. Характерные точки на осциллограмме тока дуги пронумерованы в соответствии с кадрами, отражающими эволюцию дуги.



Рис. 3. Осциллограммы сварочного тока и напряжения в дуговом промежутке масштаб по напряжению 7 В/дел., по току 100 А / дел., по времени 2 мс/дел



IV. Тепломассоперенос в зоне термического воздействия

Мощность импульса должна рассчитываться по температурной кривой распространения тепловой энергии, отображающей снижение температуры в металле с течением времени и с учетом глубины проникновения активного пятна в металл свариваемых деталей *у* [5]. Температурные кривые приведены на рис. 4.



Рис. 4. Температурные кривые распространения тепловой энергии Fig. 4. Temperature curve of thermal energy propagation

Из этих зависимостей следует необходимость в импульсах повышенной мощности при сварке толстых стенок, либо применение двух и более последовательно расположенных горелок, формирующих капли сварочного металла в одну ванну.

При переходе электродной капли в сварочную ванну наблюдается изменение кристаллического состояния этой частицы металла. Термические циклы сварки вызывают локальные пластические деформации в зоне шва и околошовной области.

При охлаждении возникают остаточные растягивающие напряжения, которые могут снизить сопротивление материала последующим нагрузкам противоположного знака – сжатию и изгибу. Это весьма важно, поскольку перед сваркой торцов с изначально овальными сечениями свариваемые трубы подвергаются центрированию специальными устройствами, чем одновременно достигается приближение их сечений к окружности [6]. После сварки конструкция из двух сваренных участков трубы подвергается знакопеременным нагрузкам [7]. При этом проявляется эффект Баушингера – предварительная пластическая деформация при сварке снижает предел текучести при обратном нагружении, увеличивая риск усталостного разрушения. На рис. 5 приведены зависимости напряжения σ от деформации ε . Здесь σ_0 растягивающее напряжение в твердом нагреваемом состоянии, σ_1 – мера в жидком нагреваемом состоянии.



Fig. 5. The Bauschinger effect

Изотропная модель характеризует твердое состояние сварочного пятна, а кинематической модели соответствует жидкое состояние металла. Эффект Баушингера необходимо минимизировать посредством контроля тепловложения.

На тепловложение в металл влияют сварочный ток, напряжение дуги и скорость сварки:

$$E = \frac{I \cdot U \cdot 60}{V \cdot 1000},\tag{2}$$

где E – тепловложение, кДж/мм; I – ток, A; U – напряжение дуги, B; V – скорость сварки, мм/мин.

Для высокопрочных сталей необходимое тепловложение должно быть обеспечено в диапазоне 0,8...1,2 кДж/мм. Это достигается посредством автоматического управления дугой посредством ЭВМ и подачей проволоки, то есть синхронизацией компонентов электротехнического комплекса – сварочного инвертора и привода перемещения сварочной головки.

Сварочные автоматы с номинальным значением сварочного тока 1000 и 1600 А работают с ПВ = 100 %, формируя дугу под флюсом и в среде защитного газа. При этом используется электродная проволока диаметром 5 и 6 мм соответственно со скоростью подачи 60...360 м/час, что обеспечивает скорость образования сварного шва 12...120 м/час. Эта информация должна лежать в основе расчета необходимого тепла для расплава капли сварочного металла и тепловложения в свариваемый металл.

V. Необходимость изменения мощности импульсов дуги при круговом движении сварочной головки

Сварочная головка совершает круговое движение по кромкам свариваемых участков трубы, а капля электродного металла переносится в зону активного пятна под действием разных сил, величина которых зависит от угла между осью сварочной головки и гравитационной вертикалью (рис. 6).

Таким образом, сварочная ванна меняет свое положение относительно горизонта, а необходимая мощность дуги должна непрерывно меняться сообразно своему положению [8]. На каплю расплавленного металла действуют следующие силы: нормальная составляющая силы поверхностного натяжения P_{0r} , тангенциальная составляющая силы поверхностного натяжения P_{0t} , равнодействующая сила P_0 , гс; G – вес сварочной ванны, гс.

Для обеспечения равномерного качества шва при всех положениях сварочной головки необходима коррекция мощности сварочных импульсов в соответствии с:

$$\vec{P}_{0} = \vec{P}_{0t} + \vec{P}_{0r}, \qquad (3)$$

где \vec{P}_0 – векторная составляющая равнодействующей силы; \vec{P}_{0r} – векторная тангенциальная составляющая равнодействующей силы; \vec{P}_{0r} – векторная нормальная составляющая равнодействующей силы. В табл. 1 приведены расчетные значения этих сил при повороте сварочной головки на угол, кратный 30° [8].

Из изложенного следует, что в систему управления инвертором необходимо вводить сигналы об угловом положении сварочной головки и о линейной скорости ее перемещения вдоль свариваемых кромок. Это позволяет создать базовые сценарии использования источника питания [8] для определенного угла поворота горелки, который будет выставляться в зависимости от изменения дугового промежутка, как часть программы управляющей ЭВМ.



Рис. 6. Модель сварочной ванны с направлением равнодействующих сил при различных положениях

Fig. 6. A model of a welding bath with the direction of the resultant forces at different positions

Скорректированные значения мощности импульса дуги при повороте сварочной головки рассчитаны в относительных единицах и приведены в последнем столбце табл. 1.

На рис. 7 приведены графики зависимостей равнодействующих сил.

Таблица 1.

Сводная таблица значений равнодействующих сил и значения мощности импульса дуги

Table 1.

Summary table of resultant forces and the value of the arc pulse power

Угол	Значение	Значение	Значение	Корректировка
поворота	равнодействую-	тангенциальной	нормальной	импульса
сварочной	щей силы	составляющей	составляющей	мощности дуги
головки	Р₀, гс	равнодействую-	равнодействую-	относительно
φ, °		щей силы	щей силы	0°
		$P_{\theta t}, rc$	P _{or} , гс	
0	8,73	0,7	8,7	1
30	8,22	-2	7,98	0,97
60	7,2	-3,98	6	0,93
90	5,74	-4,7	3,3	0,9
120	4,02	-3,98	0,6	0,85
150	2,43	-2	-1,38	0,82
180	2,22	0,7	-2,1	0,8
210	2,43	-2	-1,38	0,82
240	4,02	-3,98	0.6	0,85
270	5,74	-4,7	3,3	0,9
300	7,2	-3,98	6	0,92
330	8,22	-2	7,98	0,96
360	8,73	0,7	8,7	1



Fig. 7. Graph of dependencies of resultant forces

VI. Определение корректирующих параметров

При дуговой сварке ключевым фактором является балансировка сил, действующих на каплю расплавленного металла [9]. Равнодействующая сила включает в себя:

$$F_{\rm T} = m \cdot g - {\rm сила \ тяжести};$$

$$F_{\rm II} = 2\pi r \cdot \sigma - {\rm сила \ поверхностного \ натяжения};$$

$$F_{\rm SH} = \mu_0 \cdot I^2 \cdot \ln\!\left(\frac{R}{r}\right) - {\rm SHERTPOMAFHUTHAR \ силa};$$

$$F_{\rm p} - {\rm peaktubhar \ силa \ паров \ металлa}.$$

На этапе паузы импульсной сварки силы поверхностного натяжения и реактивная сила компенсируют силу тяжести. Электромагнитная сила минимальна, что обеспечивает стабильное удержание капли. При нарастании тока импульса электромагнитная сила возрастает пропорционально квадрату тока, создавая направленное давление на каплю, обеспечивая ее отрыв. В режиме стабильного горения дуги доминирует электромагнитная сила, формирующая мелкокапельный перенос.

Фактором влияния является плотность тока: при I > 250 А электромагнитная сила становится доминирующей. В верхних положениях сварочной ванны роль силы тяжести увеличивается.

Оптимальное распределение указанных сил достигается при соотношениях $F_{\exists\exists}:F_{\Pi}: F_{T} = 1,2:0,7:1,0$, что обеспечивает стабильный перенос металла и минимальные остаточные напряжения в соединении. Это обеспечивается регулированием сварочного тока и диаметром сварочной проволоки [10].

Проверка концепции авторов об учете и компенсации возникающих воздействий произведена на сварочном агрегате КЕДР с открытой информационной шиной, предоставленном для проведения эксперимента ООО «Авангард Проект».

VII. Выводы

В результате проведенных исследований получена температурная кривая распространения тепловой энергии и сводная таблица значений равнодействующих сил, действующих на каплю расплавленного металла. Эти результаты являются основой разработки базовых сценариев управления источником питания в зависимости от угла поворота горелки с учетом изменения дугового промежутка. Результаты предназначены для использования в алгоритме управляющей ЭВМ. Их учет при электросварке труб высокого давления обеспечивают равномерное качество шва при всех положениях сварочной головки, уменьшение количества брызг (до 40 %), управле

ние тепловложением и контролем стабильности дуги. За счет выбора сценария использования уменьшается время, необходимое для настройки оборудования непосредственно перед началом работ (до 80 %). Совокупный эффект от использования предложенных решений позволяет повысить производительность труда на 20...30 %, в зависимости от размера свариваемых труб.

> © Савчук В.С., 2025 © Плехов А.С., 2025 © Чернов Е.А., 2025

Поступила в редакцию 04.03.2025 Принята к публикации 02.05.2025 Received 04.03.2025 Accepted 02.05.205

Библиографический список

- Завьялов В.Е., Иванова И.В., Кобецкой Н.Г. Технология сварки плавлением. С.-Пб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 483 с. DOI: 10.18720/SPBPU/2/i18-111
- [2] Савчук В.С., Плехов А.С. Адаптация параметров сварочного трансформатора с учетом выходных характеристик дуги // Вестник МГТУ. 2024. Т. 27. № 4. С. 568-576. DOI: 10.21443/1560-9278-2024-27-4-568-576.
- [3] Савчук В.С., Плехов А.С. Управление сварочным инвертором для электросварки труб высокого давления // Интеллектуальная электротехника. 2023. № 4(24). С. 43–54. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_43
- [4] Доманов В.И., Доманов А.В., Карпухин К.Е., Мишин А.В. Разработка и исследование систем управления током электрической дуги. Ульяновск: УлГТУ, 2018. – 242 с.
- [5] Blondeau R. Metallurgy and mechanics of welding. Processes and industrial applications. Wiley, 2013. – 514 c.
- [6] Ахмедов А.М. Совершенствование технологической операции центровки секций труб под сварку при осуществлении строительства и методов капитального ремонта магистральных трубопроводов // Инженерный вестник Дона. 2017. № 1. [Электронный ресурс]. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/3976 (дата обращения 02.02.2025).
- [7] Залавин Я.Е. Совершенствование технологии вальцевой формовки с целью получения трубной заготовки с повышенной однородностью напряженно-деформированного состояния: дис. канд. техн. наук, ЮУрГУ (НИУ), Челябинск, 2022.
 – 132 с.
- [8] Щербаков В.В. Разработка и регулирование процесса орбитальной сварки труб поверхностного нагрева диаметром до 60 мм с программированием режима: маг. дис., ТПУ, Томск, 2021. – 125 с.
- [9] Федулова М.А. Физико-химические процессы в сварочной дуге. Екатеринбург: РГППУ, 2009. – 79 с.
- [10] Аполлонский С.М., Куклев Ю.В., Фролов В.Я. Электрические аппараты управления и автоматики. М.: Лань, 2024. – 256.

References

- V.E. Zavyalov, I.V. Ivanova and N.G. Kobetskoy, *Tekhnologiya svarki plavleniem* [*Melting welding technology*]. St. Petersburg: SPbPU, 2018. DOI: 10.18720/SPBPU/2/i18-111 (in Russian).
- [2] V.S. Savchuk and A.S. Plekhov, "Adaptation of welding transformer parameters taking into account are output characteristics", *Vestnik of MSTU*, vol.27, no. 4, pp. 568-576, 2024. DOI: 10.21443/1560-9278-2024-27-4-568-576
- [3] V.S. Savchuk and A.S. Plekhov, "Welding inverter control for electric welding of high-pressure pipes", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 43-54, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_43
- [4] V.I. Domanov, A.V. Domanov, K.E. Karpushin and A.V. Mishin, Razrabotka i issledovanie sistem upravleniya tokom elektricheskoj dugi [Development and study of electric arc current control systems]. Ulyanovsk: UISTU, 2018 (in Russian).
- [5] R. Blondeau, Metallurgy and mechanics of welding. Processes and industrial application. Wiley, 2013.
- [6] A.M. Akhmedov, "The improvement of the technology operation for lining-up of the pipe sections when building and general maintenance of main pipelines", *Engineering journal of Don*, no. 1, 2017. [Online]. Available at: Engineering Journal of Don, http://www.ivdon.ru/en.
- [7] Ya.E. Zalavin, "Sovershenstvovanie tekhnologii val'cevoj formovki s cel'yu polucheniya trubnoj zagotovki s povyshennoj odnorodnost'yu napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya [Improving the technology of roller forming in order to obtain a tubular blank with increased homogeneity of the stress-strain state]", Cand. of Tech. S. thesis, South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia, 2022 (in Russian).
- [8] V.V. Shcherbakov, "Development and regulation of the orbital welding process of surface heating pipes with the diameter of up to 60 mm with prog mode programming", Master thesis, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, 2021.
- [9] M.A. Fedulova, *Fiziko-himicheskie processy v svarochnoj duge [Physicochemical processes in a welding arc]*. Ekaterinburg: RSVPU, 2009 (in Russian).
- [10] S.M. Apollonsky, Yu.V. Kuklev, V.Ya. Frolov, *Elektricheskie apparaty upravleniya i avtomatiki [Electrical control and automation devices]*. Moscow: LAN, 2024 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Савчук Владислав Сергеевич, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

 Плехов
 Александр
 Сергеевич,

 кандидат
 технических
 наук,
 доцент

 Нижегородского
 государственного
 технического
 университета

 им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород,
 Российская Федерация.
 Сергеевич,
 серация.

Savchuk Vladislav Sergeevich, graduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Plekhov Alexander Sergeevich, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

ЧерновЕвгенийАлександрович,доктортехническихнаук,профессорНижегородскогогосударственноготехническогоуниверситетаим. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород,Российская Федерация.

Chernov Evgeny Alexandrovich, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.