

## Анализ способов повышения и критериев оценки устойчивости сварочного дугового разряда

*С.М. Бурдаков, М.И. Орехов*

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал национального  
исследовательского ядерного университета «МИФИ»*

**Аннотация:** В статье проведен анализ способов повышения и критериев оценки устойчивости сварочного дугового разряда. Наиболее перспективный способ повышения устойчивости дугового разряда, может быть осуществлен за счет импульсного, высокочастотного воздействия на сварочный контур. Приведены экспериментальные данные, полученные при исследовании комбинированной системы питания дугового разряда постоянного тока при параллельном подключении к основному сварочному источнику питания дополнительного генератора импульсов. Рассмотрено влияние импульсной составляющей от дополнительного генератора частотой 40 кГц, на устойчивость горения дугового разряда при ручной дуговой сварке покрытыми электродами. В качестве критериев оценки устойчивости горения дугового разряда были приняты такие как, разрывная длина дуги, при которой происходит её естественный обрыв и коэффициент устойчивости.

**Ключевые слова:** Устойчивость, сварочный дуговой разряд, сварка покрытыми электродами, импульсное воздействие на сварочный контур, разрывная длина дуги, коэффициент устойчивости, электромагнитное поле, генератор импульсов.

Современные исследования процессов сварки [1] показали, что основное количество дефектов зарождается в объеме сварочной ванны и определяется сложными тепловыми, гидродинамическими процессами, проходящими в ее объеме и напрямую зависящими от устойчивости горения дуги.

Устойчивость горения сварочной дуги считается главным требованием к процессу сварки плавлением [2].

Поэтому основной целью настоящей работы является анализ способов повышения и критериев оценки устойчивости сварочного дугового разряда.

Известны следующие способы воздействия на электрическую сварочную дугу с целью повышения устойчивости и ее технологических свойств.

Для повышения устойчивости в состав покрытия электродов вводят элементы с низким потенциалом ионизации ( $K, Na, Ba, Ca$ ). Повышение устойчивости горения дуги достигается за счет увеличения количества ионов. Однако этот способ имеет и недостаток - падает скорость плавления катода, что снижает эффективность сварочного процесса [3].

Повышения устойчивости горения сварочной дуги можно добиться путем подбора статической вольтамперной характеристики источника питания. Однако при слишком большой крутизне внешней статической характеристики источника питания происходит ухудшение условий проведения сварочного процесса [3].

Устойчивость дугового разряда повышается в случае, когда на дуговой разряд воздействуют продольным магнитным полем напряженностью  $H$  с помощью соленоида (рис. 1) [4].

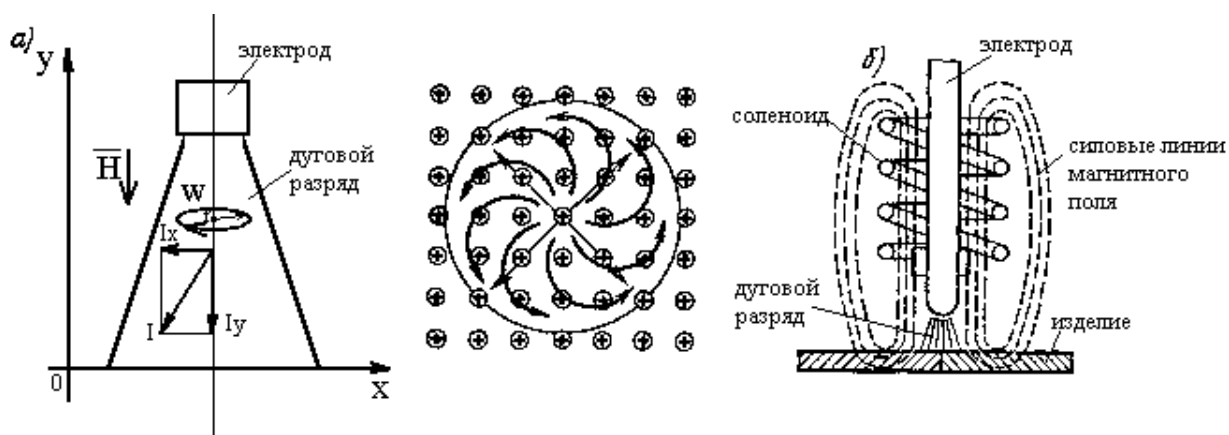


Рис. 1. – Действие продольного магнитного поля на сварочную дугу (а) и схема направляющего соленоида (б)

В работе Пчельникова Ю.Н. и Свиридова В.Т. показано, что для повышения устойчивости, контрагирования (обжатия), температуры, технологических свойств плазменного проводника производится воздействие на него сверхвысокочастотной составляющей электромагнитного поля, что имеет место в плазмотронах волнового типа (рис.2) [5].

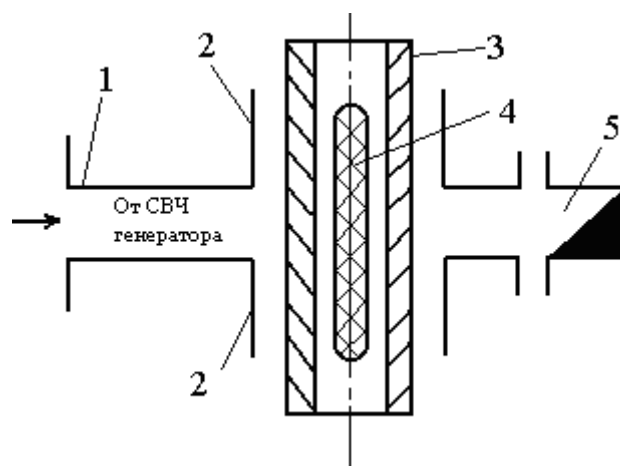


Рис. 2. – Схема устройства плазматрона волноводного типа:

- 1 – прямоугольный волновод; 2 – экранирующие трубки;  
3 – разрядная диэлектрическая трубка; 4 – плазменный шнур;  
5 – согласованная нагрузка

Коэффициент вариации, характеризующий устойчивость, составляет 2 – 3%.

Реализация указанных выше способов ограничена, особенно для процесса ручной дуговой сварки покрытыми электродами.

Один из способов повышения устойчивости и сварочно-технологических свойств дуги осуществляется в импульсно-дуговой сварке [6]. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом дает возможность работать при низких значениях сварочного тока во всех пространственных положениях при малом разбрызгивании и хорошем формировании шва. Этот способ сварки позволяет получать соединения высокого качества и применяется в основном при сварке в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродом, а также при ручной дуговой сварке.

Сварочный процесс в данном случае ведется при воздействии на дуговой разряд мощных импульсов тока с частотами 50-150 Гц.

Основная особенность импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом—управляемый перенос электродного металла.

При импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом уменьшается количество аэрозолей, образующихся в зоне дуги, по сравнению с обычной сваркой плавящимся электродом. Это связано с уменьшением времени пребывания капель в дуге. Повышаются устойчивость и динамические свойства системы: «источник питания – дуга – сварочная ванна» [7].

В зависимости от способа генерирования импульсов тока импульсными источниками питания, принципа построения силовой схемы, наличия или отсутствия сварочного источника питания базового тока и его типа можно выделить четыре основные схемы включения источников питания при импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом (рис.3).

Однако реализация преимуществ импульсно-дуговой сварки на производстве встречает затруднения из-за отсутствия систематизированных, обоснованных данных для выбора оптимальных режимов сварки и соответствующего оборудования.

Улучшение сварочно-технологических свойств и устойчивости горения дуги наблюдается при воздействии на динамические характеристики источника питания [7].

Исходя из выше изложенного, необходимо разработать такую структурную схему сварочного контура, параметры которой учитывали бы специфику динамических процессов в сварочной ванне и способствовали повышению устойчивости горения сварочной дуги.

К наиболее распространенным источникам питания для дуговой сварки относятся универсальные сварочные выпрямители серии ВДУ. Эта серия содержит четыре типа источников: ВДУ-305, ВДУ-504, ВДУ-1201, ВДУ-1601 соответственно по 300 А, 500 А, 1200 А и 1600 А. Выпрямители этой серии состоят из двух основных устройств: силовой части и устройства управления.

В зависимости от вида внешней характеристики, время переходного процесса источников питания серии ВДУ [8] колеблется от 20 до 70 мс.

---

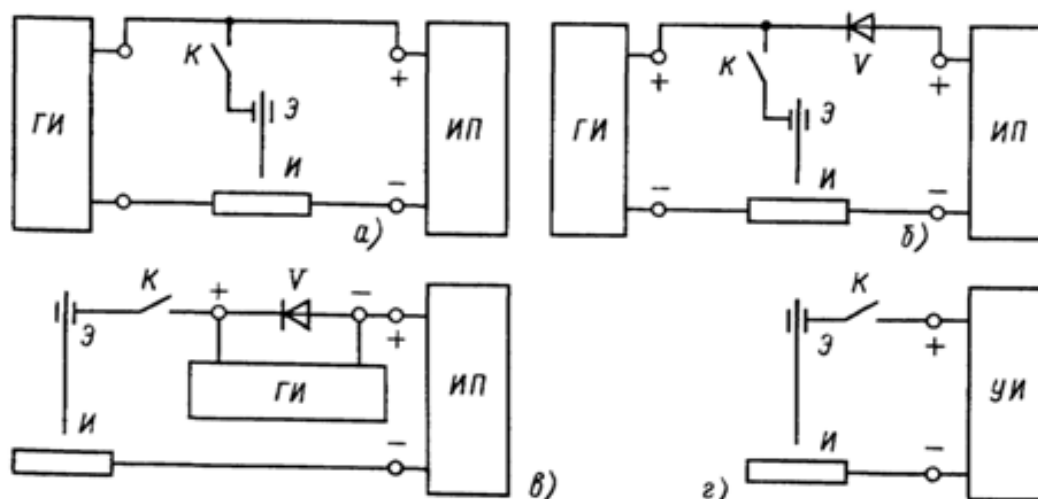


Рис. 3. – Схемы включения источников питания при импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом (ГИ—генератор импульсов; ИП—сварочный источник; УИ— универсальный импульсный источник; К— замыкающий контакт силового контактора; V—диод; Э—плавящийся электрод; И—изделие): а—параллельное включение ГИ и выпрямителя; б— параллельное включение ГИ и преобразователя; в—последовательное включение ГИ и выпрямителя; г—питание сварочного поста от УИ.

Очевидно, что динамические свойства серийных источников питания ограничивают их использование для регулирования быстродействующих тепловых процессов при плавлении электрода и гидродинамических процессов в сварочной ванне.

Повышение быстродействия современных источников питания имеет две отчетливо выраженные тенденции. Первая из них основана на использовании быстродействующей инверторной техники [9], а вторая связана с совершенствованием управления [10]. Использование инверторной техники связано со значительным усложнением схемы управления и удорожания источников в целом.

Следовательно, наиболее перспективным путем повышения устойчивости дугового разряда, системы «источник питания – дуга – сварочная ванна» и динамических свойств источников питания может быть

осуществлено за счет импульсного, высокочастотного воздействия на сварочный контур.

Поэтому, особую актуальность приобретает модернизация источников серии ВДУ и аналогичных путем выделения устройства управления как самостоятельной системы и оснащение разработанным устройством как находящихся в эксплуатации, так и новых источников питания без вмешательства в его схему управления, как это предлагается при осуществлении импульсно-дуговой сварки.

Для питания сварочной дуги может применяться переменный и постоянный ток, но возможно их комбинированное применение [11]. Переменный ток может иметь различные частоты до нескольких  $10^6$  Гц [11]. В данном случае имеется в виду комбинированное применение постоянного тока основного сварочного источника и переменного высокочастотного от вспомогательного устройства.

Исходя из современных представлений о физике низкотемпературной плазмы, можно сказать, что наложение высокочастотного квазигармонического сигнала по напряжению на дуговой разряд постоянного тока способствует повышению его устойчивости [12].

При выборе объективных критериев оценки устойчивости дугового разряда следует исходить из оценки конечного результата сварки – шва, основные параметры которого при соответствующих металлургических свойствах сварочного материала (обеспечивающих в оптимальных условиях хорошее формирование шва), при качественном проведении подготовительных операций однозначно определяются характером горения дуги и переносом металла.

Следовательно, показатели, характеризующие свойства дуги, могут быть положены в основу объективной оценки стабильности процесса сварки в целом [13].

Важным критерием устойчивости дугового разряда считается его разрывная длина  $l_p$ , при которой происходит её естественный обрыв. Чем больше  $l_p$ , тем устойчивее дуговой разряд. Способ оценки устойчивости дугового разряда по  $l_p$  ввиду своей простоты и наглядности получил довольно широкое применение [11].

Для оценки устойчивости особый интерес представляет коэффициент устойчивости  $S$  [14]:

$$S = \frac{l_p - \delta}{\delta}, \quad (1)$$

где  $\delta$  – величина рабочего зазора между сварочным электродом и пластиной (3 мм).

Данный коэффициент является более универсальным критерием оценки устойчивости сварочного дугового разряда, так как позволяет учитывать изменение величины рабочего зазора между сварочным электродом и изделием в процессе сварки. Изменение величины рабочего зазора проявляется в сварочных соединениях, выполняемых в монтажных, ремонтных, полевых условиях.

Эксперименты выполняли по методике [3]. Схема установки соответствует приведенной на рис. 4. Сравнивали устойчивость горения дуги с наложением высокочастотного квазигармонического сигнала по напряжению и без него. Исследовали дуговой разряд постоянного тока в режиме  $I_\delta=100$  А,  $U_\delta=22$ В с наложением и без наложения напряжения частотой  $f=40$ кГц, длительность импульса  $t_u=15$  мс, использовался электрод УОНИИ 13/45  $d=3$ мм. Наложение на дуговой разряд электрического импульсного воздействия повышенной частоты

---

производилось от генератора импульсов (ГИ) подключенного параллельно к основному источнику.

В качестве критериев определения устойчивости горения дугового разряда примем разрывную длину дуги  $l_p$ , при которой происходит её естественный обрыв и коэффициент устойчивости  $S$ .

Для перспективных исследований системы «источник питания – дуга – сварочная ванна» могут быть рекомендованы коэффициенты вариации сварочного тока  $KVI_{св}$  и напряжения на дуге  $KVU_d$  [13], вычисления инновационных определителей [15].

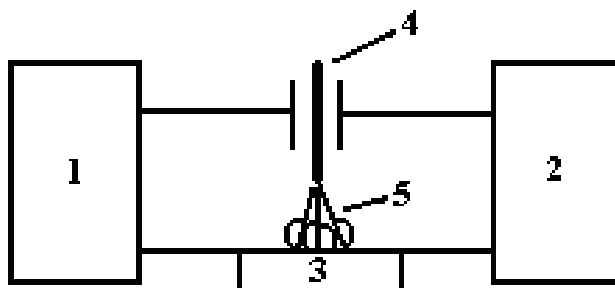


Рис. 4. – Структурная схема установки для проведения эксперимента: 1 – источник питания постоянного тока ВДУ-504;

2 – устройство для наложения высокочастотного квазигармонического сигнала по напряжению (20-300 кГц);

3 – металлическая пластина; 4 – покрытый электрод; 5 – сварочная дуга.

Были получены экспериментальные данные по определению принятых критериев устойчивости дугового разряда показанные в таблице №1, для нижнего положения сварочной ванны.

Разрывная длина  $l_p$  для режима сварки №4 (с наложением высокочастотной компоненты) и №1 (без наложения) увеличилась на 33,3%, для режима сварки №5 и №2 на 29,4%, а для режима сварки №6 и №3 на 38,9%.



Коэффициент устойчивости  $S$  определяемый по (1) для режима сварки №4 и №1 увеличился на 42.5%, для режима сварки №5 и №2 на 34%, для режима сварки №6 и №3 на 46%.

Полученные результаты экспериментальных данных по определению параметров дугового разряда с наложением напряжения частотой  $f=40\text{кГц}$ , длительность импульса  $t_u=15$  мс свидетельствует об увеличении его устойчивости по сравнению с рекомендуемыми режимами сварки для данной марки электродов в 1,3–1,5 раза.

Таблица №1.

Экспериментальные данные по определению устойчивости дугового разряда

№ Режима сварки	Параметры сварочного процесса				$l_p$ , мм	$S$
	$I_{св}$ , А	$U_d$ , В	$f$ , кГц	$t_u$ , мс		
1.	100	24	–	–	15	4
2.	120	26	–	–	17	4,7
3.	140	27	–	–	18	5
4.	100	26	40	15	20	5,7
5.	120	28	40	15	22	6,3
6.	140	30	40	15	25	7,3

Проведенные экспериментальные исследования и положительные результаты опытного опробования разработанной системы питания дугового разряда позволяют рекомендовать ее для применения при монтаже ответственных металлических конструкций.

### Литература

1. Чернов А.В. Обработка информации в системах контроля и управления сварочным производством. Новочеркасск: НГТУ, 1995. 180 с.



2. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
  3. Chernov A.V., Yu.V. Poletaev, Z.O. Karvishvili and S.M. Burdakov, 2000. Increasing the stability of arcing in welding with coated electrodes. *Welding International*, 14(8): pp. 640-641.
  4. Фролов В.В. Теория сварочных процессов. М.: Высшая школа, 1988. 559 с.
  5. Пчельников Ю.Н., Свиридов В.Т. Электроника сверхвысоких частот. М.: Радио и связь, 1981. 96 с.
  6. Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н., Ленивкин В.А. Оборудование для импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом. М.: Энергоатомиздат, 1985. 80 с.
  7. Уваров А.Ф. Транзисторный инверторный источник питания для импульсной дуговой сварки // *Сварочное производство*. 1988. №10. С. 25-26.
  8. Смирнов В.В. Оборудование для дуговой сварки. СПб.: Энергоатомиздат, 1986. 656 с.
  9. Созонов С.В., Бородин Д.М., Обухов А.Г., Конев В.В., Карнаухов М.М. Ремонт автотранспортной и специальной техники в полевых условиях // *Инженерный вестник Дона*, 2014, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2510/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2510/).
  10. Бортняков Ю.А., Шаверов В.Н., Курошин А.В., Филиппович Г.М. Микропроцессорное управление электросварочным оборудованием // *Сварочное производство*. 1986. №11. С. 10-11.
  11. Хренов К.К. Электрическая сварочная дуга. М.–Киев: Машгиз, 1949. 203 с.
-

12. Burdakov S.M., A.V. Chernov, Yu.V. Poletaev, S.V. Polezhaev, 2002. Physical model of electric arc discharge with the application of high-frequency voltage. *Welding International*, 16 (4): pp. 317-319.

13. Букаров В.А., Ермаков С.С., Дорина Т.А. Оценка стабильности дуговой сварки по осциллограммам процесса с использованием статистических методов // Сварочное производство. 1990. №12. С. 30-32.

14. Рябов И.В. Устойчивость дуги при электроконтактной обработке // Сварочное производство. 1976. №2. С. 32-33.

15. Смоляков В.Н. Анализ абсолютной устойчивости нелинейных импульсных систем посредством вычисления инновационных определителей // Инженерный вестник Дона, 2016, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3528/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3528/).

### References

1. Chernov A.V. *Obrabotka informatsii v sistemakh kontrolya i upravleniya svarochnym proizvodstvom*. [Information processing in control and management systems for welding production]. Novocherkassk: NGTU, 1995. 180 p.

2. Leskov G.I. *Elektricheskaya svarochnaya duga* [Electric welding arch]. M.: Mashinostroenie, 1970. 335 p.

3. Chernov A.V., Yu.V. Poletaev, Z.O. Karvishvili and S.M. Burdakov, 2000. Increasing the stability of arcing in welding with coated electrodes. *Welding International*, 14(8): pp. 640-641.

4. Frolov V.V. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. M.: Vysshaya shkola, 1988. 559 p.

5. Pchel'nikov Yu.N., Sviridov V.T. *Elektronika sverkhvysokikh chastot* [Electronics of ultrahigh frequencies]. M.: Radio i svyaz', 1981. 96 p



6. Dyurgerov N.G., Sagirov Kh.N., Lenivkin V.A. Oborudovanie dlya impul'sno-dugovoy svarki plavyashchimsya elektrodom [The equipment for pulse and arc welding by the melting electrode]. M.: Energoatomizdat, 1985. 80 p.
7. Uvarov A.F. Svarochnoe proizvodstvo. 1988. №10. pp. 25-26.
8. Smirnov V.V. Oborudovanie dlya dugovoy svarki [Equipment for arc welding]. SPb.: Energoatomizdat, 1986. 656 p.
9. Sozonov S.V., Borodin D.M., Obukhov A.G., Konev V.V., Karnaukhov M.M. Inzhenernyy vestnik Dona (Rus), 2014, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2510/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2510/).
10. Bortnyakov Yu.A., Shaverov V.N., Kuroshin A.V., Filippovich G.M. Svarochnoe proizvodstvo. 1986. №11. pp. 10-11.
11. Khrenov K.K. Elektricheskaya svarochnaya duga [Electric welding arch]. M.–Kiev: Mashgiz, 1949. 203 p.
12. Burdakov S.M., A.V. Chernov, Yu.V. Poletaev, S.V. Polezhaev, 2002. Physical model of electric arc discharge with the application of high-frequency voltage. *Welding International*, 16 (4): pp. 317-319.
13. Bukarov V.A., Ermakov S.S., Dorina T.A. Svarochnoe proizvodstvo. 1990. №12. pp. 30-32.
14. Ryabov I.V. Svarochnoe proizvodstvo. 1976. №2. pp. 32-33.
15. Smolyakov V.N. Inzhenernyy vestnik Dona (Rus), 2016, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3528/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3528/).