

В.Н. СИДОРЕЦ, д-р техн. наук, в.н.с. Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

А.И. БУШМА, канд. техн. наук, н.с. Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

А.М. ЖЕРНОСЕКОВ, канд. техн. наук, с.н.с. Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев

Е.Н. ВЕРЕЩАГО, канд. техн. наук, доц., Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев

ОСОБЕННОСТИ ГАЗОВОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ

С помощью обобщенной математической модели динамической дуги исследована динамика радиуса импульсного дугового и лазерно-дугового разрядов. Определено, что скорость изменения радиуса разряда может превышать скорость звука. При переходе через звуковой барьер возникает ударная волна, которая разрушает газовую защиту разряда. Это необходимо учитывать при создании новых импульсных лазерно-дуговых технологий и совершенствовании существующих импульсно-дуговых технологий.

Ключевые слова: математическая модель, импульсный дуговой разряд, лазерно-дуговой разряд.

За допомогою узагальненої математичної моделі динамічної дуги досліджена динаміка радіуса імпульсного дугового та лазерно-дугового розрядів. Визначено, що швидкість зміни радіуса розряду може перевищувати швидкість звука. При переході через звуковий бар'єр виникає ударна хвиля, яка руйнує газовий захист розряду. Це необхідно враховувати при створенні нових імпульсних лазерно-дугових технологій та вдосконаленні існуючих імпульсно-дугових технологій.

Ключові слова: математична модель, імпульсний дуговий розряд, лазерно-дуговий розряд.

Using the generalized mathematical model of the dynamic arc, dynamics of the radius of the pulsed arc discharge and the pulsed laser-arc discharge is investigated. It is determined that the rate of change of the radius of the discharge can exceed the sound speed. In passing through the sound barrier, a shock wave that destroys the gas discharge protection arises. This should be considered when creating new pulsed laser-arc technologies and improving of existing pulsed arc technologies.

Key words: mathematical model, pulsed arc discharge, laser-arc discharge.

Введение. Процесс импульсно-дуговой сварки продолжает оставаться одним из самых перспективных сварочных процессов. Объяс-

© В.Н. Сидорец, А.И. Бушма, А.М. Жерносеков, Е.Н. Верещаго, 2012

няется это большим количеством преимуществ по сравнению со сваркой на постоянном токе. Среди них: увеличение проплавления основного металла, увеличение скорости плавления электродной проволоки, качественное формирование сварного шва, возможность сварки в любых пространственных положениях, возможность осуществления различных типов переноса электродного металла. Подбор и оптимизация параметров сварочного процесса связанных с параметрами импульсов (амплитуде, частоте, скорости нарастания тока) дает дополнительные возможности управления сварочным процессом и получение качественных изделий.

Очень важным параметром процесса импульсно-дуговой сварки является скорость нарастания тока импульса. Именно при больших скоростях проявляются вышеуказанные преимущества. Однако опыт показывает, что при определенных скоростях наблюдается разрушение газовой защиты дугового разряда, что приводит к нестабильности сварочного процесса и появлению дефектов сварных швов.

Цель и задачи исследований. Настоящая работа посвящена исследованию стабильности газовой защиты импульсно-дугового разряда, т.к. от этой стабильности зависит стабильность технологического процесса в целом. В частности, такие исследования важны при разработке новых сварочных технологий, например, технологии импульсной лазерно-дуговой сварки, предложенной авторами [1].

Математическая модель динамики радиуса столба электрической дуги. Особенность обобщенной модели динамической дуги по сравнению с другими [2] является возможность выражения внутренней энергии столба дуги через ее электрические параметры.

А именно, из обобщенной математической модели динамической дуги [3] следует, что

$$Q = 2\theta \int_0^{i_0} U(i_\theta) di_\theta . \quad (1)$$

В обобщенной математической модели θ – постоянная времени дуги; i_0 – ток состояния дуги, определяемый как ток установившегося состояния на статической вольтамперной характеристике (ВАХ) дуги, соответствующего данному динамическому состоянию, характеризующемуся током i [3].

Статическая ВАХ дуги описывается зависимостью $U(i_0)$. В частном случае статической ВАХ степенного вида

$$U(i_{\theta}) = U_0 \left(\frac{i_{\theta}}{I_0} \right)^n, \quad (2)$$

где I_0 и U_0 – ток и напряжение в фиксированной точке на ВАХ дуги; n – безразмерный показатель степени ($n = 0$ для ВАХ независимой от тока; $n = -1/3$ для свободно горящих дуг; $n = -1$ для дуг постоянной мощности), уравнение (1) приводится к следующему виду

$$Q = \frac{2}{1+n} U_0 I_0 \theta \left(\frac{i_{\theta}}{I_0} \right)^{1+n}. \quad (3)$$

С другой стороны, внутренняя энергия столба электрической дуги может быть выражена через термодинамические функции плазмы:

$$Q = l_A \int_0^{r_A} \left(\int_{T_0}^{T_A(r)} c_{pv}(T) dT \right) 2\pi r dr \quad (4)$$

где T_0 – температура окружающей среды; T_A – температура плазмы столба дуги, являющаяся функцией текущего радиуса r ; $c_{pv}(T)$ – удельная объемная теплоемкость; $c_{pv} = \rho_p \cdot c_p$; ρ_p – плотность плазмы столба дуги; c_p – удельная массовая теплоемкость плазмы.

Если воспользоваться теоремой о среднем, то уравнение (4) можно представить в виде

$$Q = \pi r_A^2 l_A \int_{T_0}^{T_{A,av}} c_{pv}(T) dT = \pi r_A^2 l_A q, \quad (5)$$

где $T_{A,av}$ – эквивалентное среднее значение температуры плазмы по поперечному сечению столба дуги; q – средняя удельная внутренняя энергия плазмы.

Приравняв правые части выражений (5) и (3), находим

$$r_A = \sqrt{\frac{2E_0 I_0 \theta}{(1+n)\pi q}} \cdot \left(\frac{i_{\theta}}{I_0} \right)^{\frac{1+n}{2}}. \quad (6)$$

Здесь $E_0 = U_0/l_A$ – напряженность электрического поля в столбе дуги. Отметим, что значение $T_{A,av}$ слабо зависит от тока дуги и определяется в основном составом газа и электродов [4, 5, 6], поэтому подкоренное выражение в формуле (6) можно с достаточной для практики точностью считать не зависящим от i_{θ} .

При $i_{\theta} = I_0$ значение $r_A = r_{A0}$, и из формулы (6) следует, что

$$r_A(t) = r_{A0} \left(\frac{i_\theta(t)}{I_0} \right)^{\frac{1+n}{2}}. \quad (7)$$

Выражение (7) задает закон изменения радиуса столба дуги r_A во времени и может рассматриваться как модель динамики радиуса столба дуги. С помощью этой модели можно ставить и решать задачи технологического содержания, где важным является изменение радиуса столба дуги во времени.

Ударные звуковые волны. Если в кривой тока имеются скачки (ступени), то при определенной их амплитуде скорость расширения канала дуги может превысить скорость звука, что порождает ударную волну. Этим обстоятельством можно объяснить тот экспериментальный факт, что при модулировании тока импульсами прямоугольной формы уровень интенсивности звука существенно возрастает [7].

Действительно, из уравнения (7) следует, что

$$\frac{dr_A}{dt} = \frac{1}{2} r_{A0} (1+n) I_0^{\frac{1+n}{2}} i_\theta^{\frac{1-n}{2}} \frac{di_\theta}{dt}. \quad (8)$$

Значение производной тока состояния по времени в уравнение (8) возьмем из дифференциального уравнения модели динамической дуги [8] и учтя, что в начальный момент скачка от тока I_0 до тока I_1 при $t = 0$ значения $i_\theta = I_0$, $i = I_1$

$$\left. \frac{dr_A}{dt} \right|_{t=0} = r_{A0} \frac{1+n}{4\theta} \left(\frac{I_1^2}{I_0^2} - 1 \right) \quad (9)$$

Ударная волна возникает в том случае, если

$$\left. \frac{dr_A}{dt} \right|_{t=0} \geq c \quad (10)$$

Отсюда следует, что условие возникновения ударной звуковой волны может быть записано в виде

$$\frac{I_1}{I_0} \geq \sqrt{\frac{4\theta c}{(1+n)r_{A0}} + 1} \quad (11)$$

При значениях параметров дуги $\theta = 1 \cdot 10^{-5} \text{ с}$, $n = -1/3$, $r_{A0} = 2 \text{ мм}$ ударная волна возникает при $I_1 / I_0 > 3,31$.

Как известно, ударная волна разрушает газовую защиту, что приводит к проникновению атмосферного воздуха в сварочную зону и образованию различных дефектов.

В этом случае сварочный процесс сопровождается резкими хлопками большой интенсивности, которые хорошо слышны оператором-сварщиком.

Динамическое силовое воздействие лазерно-дугового разряда. Воспользуемся результатами работ [9], которые посвящены проблеме силового воздействия электрической дуги. Хотя в них довольно точно учтены все электромагнитные механизмы силового воздействия электрической дуги, анализ силового воздействия дан только в статике, а зависимость геометрических размеров электрической дуги, в частности радиуса ее столба, от величины тока во внимание не принималась. Постараемся расширить область применения имеющейся модели на случай лазерно-дугового разряда, при этом будем использовать те результаты работ [9], которые остаются правомерными и в случае изменяющегося радиуса разряда.

В первую очередь это касается такой важной характеристики силового воздействия, как давление на оси лазерно-дугового разряда. Поскольку лазерная составляющая является безтоковой, выражение для давления на оси лазерно-дугового разряда не отличается от выражения давления на оси дуги [9]

$$P_{\max} = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi^2 r_A^2}, \quad (12)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, i – ток дуги.

Формула (12) получена [9] для случая, когда радиус разряда величина постоянная ($r_A = \text{const}$), но она остается справедливой, когда радиус r_A является величиной изменяющейся.

Анализ динамического силового воздействия лазерно-дугового разряда. С учетом формулы (8) выражение для давления (12) по оси лазерно-дугового разряда P_{\max} в динамике можно переписать в виде

$$P_{\max}(t) = \frac{\mu_0}{4\pi^2} \cdot \frac{i^2(t)}{r_{A0}^2} \cdot \left(\frac{I_0}{i_0(t)} \right)^{1+n}. \quad (13)$$

Этим выражением (13) можно воспользоваться для анализа силовых характеристик автоколебательных режимом лазерно-дугового разряда, т.к. при исследовании электрических цепей с лазерно-дуговым разрядом [10] нами были получены временные зависимости, как тока разряда $i(t)$, так и его тока состояния $i_0(t)$.

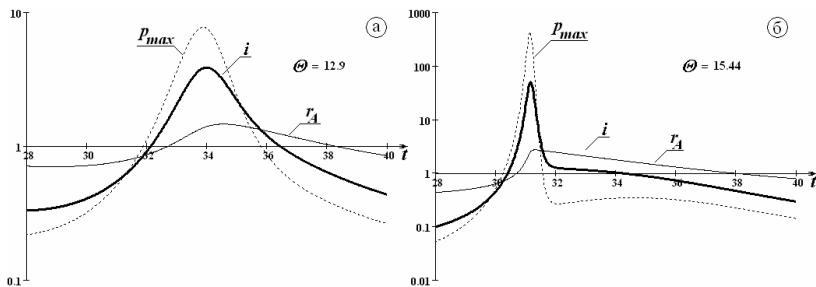


Рис. 1 – Временные зависимости тока лазерно-дугового разряда $i(t)$, его радиуса $r_A(t)$ и давления на оси разряда $p_{\max}(t)$: а – колебания, близкие к гармоническим; б – релаксационные колебания (ось ординат – логарифмическая).

Анализ кривых на рис. 1 показывает, что в случае как гармонических, так и релаксационных колебаний значение давления на оси разряда может превышать аналогичные значения давления при сварке на постоянном токе [1]. Этим объясняется увеличение глубины проплавления. Однако в случае релаксационных колебаний наблюдается большая скорость нарастания радиуса лазерно-дугового разряда.

Для исследования этого вопроса были построены временные зависимости радиуса лазерно-дугового разряда $r_A(t)$ и скорости его изменения (рис. 2). На этих же графиках был отложено значение уровня скорости звука (пунктирная линия), который в безразмерном виде представляется как

$$c_s = \frac{c\theta}{r_A}. \quad (14)$$

Как видно из рис. 2,а при колебаниях, близких к гармоническим, скорость изменения радиуса лазерно-дугового разряда гораздо меньше скорости звука. Очевидно, что в этом случае ничего не грозит газовой защите разряда.

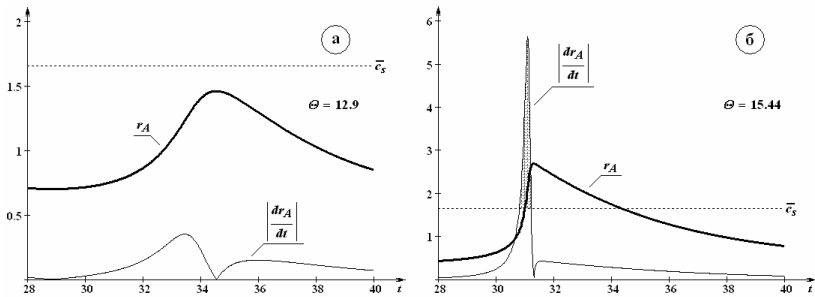


Рис. 2 – Временные зависимости радиуса лазерно-дугового разряда $r_A(t)$ и скорости его изменения: а – колебания, близкие к гармоническим; б – релаксационные колебания.

При релаксационных колебаниях скорость изменения радиуса лазерно-дугового разряда может превышать скорость звука (затемненный участок на рис. 2, б). Переход через звуковой барьер сопровождается возникновением ударной волны, которая приводит к разрушению газовой защиты.

Выводы.

1. При изменении тока импульсного дугового и лазерно-дугового разрядов могут возникать ударные звуковые волны, когда скорость изменения радиуса разряда превышает скорость звука.

2. Ударная звуковая волна может стать причиной разрушения газовой защиты, нестабильности сварочного процесса и возникновению дефектов сварных швов.

3. При создании новых импульсных лазерно-дуговых технологий и совершенствовании существующих импульсно-дуговых технологий необходимо учитывать, что скорость изменения тока должна лежать в определенном диапазоне, верхний предел которого соответствует разрушению газовой защиты разряда.

Поддержка научных исследований. Научные исследования, результаты которых изложены выше, проведены при финансовой поддержке "Государственного фонда фундаментальных исследований Украины" в рамках совместного украинско-российского проекта ДФФД-РФФИ-2011 (грант Ф40.7/047).

Список литературы: 1. *А.И. Бушма, В.Н. Сидорец.* Технологические характеристики колебательного лазерно-дугового разряда // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія "Технічні науки" – 2012. – №2(57). – С. 96-100. 2. *Пентегов И.В.* Сравнительный анализ математических моделей динамической сварочной дуги / *И.В. Пентегов, В.Н. Сидорец.* // Автоматическая сварка. – 1989. – № 2. – С. 33-36. 3. *Пентегов И.В.* Энергетичес-

кие параметры в математической модели динамической сварочной дуги / *И.В. Пентегов, В.Н. Сидорец* // Автоматическая сварка. – 1988. – № 11. – С. 36-40. **4.** Отключение токов в сетях высокого напряжения / Под ред. К. Рагаллера. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 328 с. **5.** *Поршнев П.И.* Энергобаланс положительного столба газового разряда атмосферного давления / *П.И. Поршнев.* // Инженерно-физический журнал. – 1990. – Т. 58, № 5. – С. 814-820. **6.** *Лелевкин В.М.* Двухтемпературная модель столба сварочной дуги / *В.М. Лелевкин, В.С. Мечев, В.Ф. Семенов* // Автоматическая сварка. – 1990. – № 6. – С. 10-14. **7.** *Futamata M.* Investigation on Welding Arc Sound (Rep.5). Effect of Welding Method and Welding Condition of Welding Sound (II) / *M. Futamata, T.Toh, K. Inoue, et al* // ИВВ VIII-1344-86. – 7 р. **8.** *Пентегов И.В.* Математическая модель столба динамической электрической дуги / *И.В.Пентегов* // Автоматическая сварка. – 1976. – № 6. – С. 8-12. **9.** *Лебедев В.К.* Силовое воздействие сварочной дуги / *В.К. Лебедев, И.В. Пентегов* // Автоматическая сварка. – 1981. – № 1. – С. 7-15. **10.** *Бушма А.И., Сидорец В.Н.* Амплитудно-частотные характеристики автоколебаний в цепи с лазерно-дуговым разрядом // Электротехника і електромеханіка. – 2012. – № 3. – С.15-18.

Поступила в редколлегию 26.11.2012



Сидорец Владимир Николаевич, доктор технических наук. Защитил диссертации кандидата и доктора технических наук в Институте электродинамики НАН Украины по специальности Теоретическая электротехника, соответственно в 1992 и 2009 гг. Ведущий научный сотрудник отдела "Физика газового разряда и техника плазмы" Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины с 2009 г. Научные интересы связаны с проблемами моделирования нелинейных цепей с электрической дугой, взаимодействия лазерного излучения с металлами, детерминированного хаоса и странных аттракторов.



Бушма Александр Иванович, кандидат технических наук. Защитил диссертацию кандидата технических наук в Национальном техническом университете Украины "Киевский политехнический институт" по специальности Процессы физико-технической обработки в 2008 г. Научный сотрудник отдела "Физика газового разряда и техника плазмы" Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины с 2006 г. Научные интересы связаны с проблемами лазерной обработки материалов, комбинированных лазерно-дуговых процессов.



Жерносеков Анатолий Максимович, кандидат технических наук. Защитил диссертацию кандидата технических наук в Институте электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины по специальности Автоматизация сварочных процессов в 2004 г. Старший научный сотрудник отдела источников питания Института электросварки им. Е.О. Патона с 2007 г.

Научные интересы связаны с исследованиями технологий, оборудования и автоматизации процессов электродуговой сварки, процессов импульсно-дуговой с варки плавящимся электродом в защитных газах.



Верещаго Евгений Николаевич, кандидат технических наук. Защитил диссертацию кандидата технических наук в Национальном университете кораблестроения им. адм. Макарова по специальности Сварка и родственные процессы в 2001 г. Доцент кафедры сварочного производства НУК с 2004 г.

Научные интересы связаны с исследованиями технологий и систем управления импульсными источниками питания для электротехнологических установок, исследованиями квазирезонансных импульсных преобразователей для плазменных технологии.