

19. Походня И. К. Плавление электродов и взаимодействие металла с газами при дуговой сварке: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И. К. Походня. – К., 1968. – 42 с.
20. Петров А. В. Перенос металла в дуге при сварке плавящимся электродом в среде защитных газов / А. В. Петров // Автоматическая сварка. – 1955. – № 2. – С. 26-33.
21. Дятлов В. И. Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке / В. И. Дятлов // Новые проблемы сварочной техники: сборник. – К.: Техника, 1964. – С. 167-182.
22. Хренов К. К. Электрическая сварочная дуга / К. К. Хренов. – М.: Машгиз, 1949. – 204 с.

УДК 621.791.75:537.523:621.373.7

А.И. Бушма, канд. техн. наук

В.Н. Сидорец, д-р техн. наук

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРНО-ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Найдено закономерности изменения радиуса при изменении тока, что позволило определить динамическое силовое воздействие колебательного лазерно-дугового разряда. Установлено, что давление по оси разряда на фронте импульса тока колебательного лазерно-дугового разряда гораздо больше, чем давление, создаваемое лазерно-дуговым разрядом постоянного тока, особенно, если колебания близки к релаксационным. По своему силовому воздействию колебательный лазерно-дуговой разряд подобен известным процессам дуговой сварки модулированным током и импульсно-дуговой сварки.

Знайдені закономірності зміни радіуса при зміні струму, що дозволило визначити динамічну силову дію коливального лазерно-дугового розряду. Встановлено, що тиск по осі розряду на фронті імпульсу струму коливального лазерно-дугового розряду набагато більший, ніж тиск, що створюється лазерно-дуговим розрядом постійного струму, особливо, якщо коливання близькі до релаксаційних. По своєму силовій дії коливальний лазерно-дуговий розряд подібний відомим процесам дугового зварювання модульованим струмом та імпульсно-дугового зварювання.

Regularities of the radius change when the current changes, which allowed determining the dynamic force effect of the oscillatory laser-arc discharge, were been found. It is established that the pressure on the axis of the discharge on the front of current pulse of oscillating laser-arc, far more than the pressure produced by dc laser-arc discharge, especially if the oscillations are close to the relaxation ones. In terms of power influence the oscillating laser-arc is similar to the known processes of the arc welding by modulated current and pulse-arc welding.

Введение. Комбинированные лазерно-дуговые процессы и технологии, в частности сварка и обработка материалов [1-3], обеспечивают значительное увеличение производительности изготовления изделий, а также повышение их качества. Синергетический эффект при воздействии лазерного пучка и электрической дуги на обрабатываемую поверхность позволяет получить новые типы изделий, соединений и конструкций, которые невозможно осуществить с помощью лазера и электрической дуги в отдельности. Именно поэтому в последние десятилетия эти процессы привлекают пристальное внимание ученых всего мира.

Авторами были разработаны принципы построения специализированных источников питания лазерно-дугового разряда [4], т. к. применение обычного сварочного оборудования, в частности источников питания электрической дуги, не всегда экономически оправдано.

Решение этой задачи базировалось на анализе электрических цепей с сосредоточенными параметрами, в состав которых входит лазерно-дуговой разряд, как элемент цепи. Для этого авторами было проведено исследование статических вольтамперных характеристик этого разряда [5].

Было обнаружено, что в исследуемой системе могут возникать автоколебания тока лазерно-дугового разряда, и исследованы их амплитудно-частотные характеристики [6]. Сделан вывод, что эти автоколебания могут стать основой при разработке новых сварочных технологий. Амплитудно-частотные характеристики показали, что эти технологии подобны известным технологиям дуговой сварки модулированным током и импу-

льно-дуговой сварки. Именно эти процессы имеют неоспоримые технологические преимущества перед обычным дуговым сварочным процессом.

Данная работа посвящена исследованию технологических характеристик автоколебаний тока лазерно-дугового разряда, в частности его силового воздействия.

Динамическое силовое воздействие лазерно-дугового разряда. Воспользуемся результатами работ [7], 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 [7], 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 [7]

$$P_{\max} = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi^2 r_A^2}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, i – ток дуги.

Формула (1) получена [7] для случая, когда радиус разряда величина постоянная ($r_A = \text{const}$), но она остается справедливой, когда радиус r_A является величиной изменяющейся.

Динамика радиуса лазерно-дугового разряда. В работе [8] показано, что динамику лазерно-дугового разряда можно описывать с помощью обобщенной модели динамической дуги, если статическую вольтамперную характеристику (ВАХ) и постоянную времени дуги заменить на статическую ВАХ и постоянную времени лазерно-дугового разряда соответственно.

Особенность обобщенной модели динамической дуги по сравнению с другими является возможность выражения внутренней энергии столба дуги через ее электрические параметры.

А именно, из обобщенной математической модели динамической дуги [9] следует, что

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

где θ – постоянная времени лазерно-дугового разряда; i_θ – ток состояния [9].

Статическая ВАХ лазерно-дугового разряда описывается зависимостью $U(i_\theta)$. Нами использовалась статическая ВАХ степенного вида

$$U(i_\theta) = U_0 \left(\frac{i_\theta}{I_0} \right)^n, \quad (3)$$

где I_0 и U_0 – ток и напряжение в фиксированной точке на ВАХ лазерно-дугового разряда; n – безразмерный показатель степени ($n < 0$), что приводит формулу (2) к следующему виду

$$Q = \frac{2}{1+n} U_0 I_0 \theta \left(\frac{i_\theta}{I_0} \right)^{1+n}. \quad (4)$$

С другой стороны, внутренняя энергия лазерно-дугового разряда может быть выражена через термодинамические функции плазмы

$$Q = l_A \int_0^{r_A} \left(\int_{T_0}^{T_A(r)} c_{pv}(T) dT \right) 2\pi r dr, \quad (5)$$

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

Если воспользоваться теоремой о среднем, то уравнение (5) можно представить в виде

$$Q = \pi r_A^2 l_A \int_{T_0}^{T_{A,av}} c_{pv}(T) dT = \pi r_A^2 l_A q. \quad (6)$$

Здесь $T_{A,av}$ – эквивалентное среднее значение температуры плазмы по поперечному сечению лазерно-дугового разряда; q – средняя удельная внутренняя энергия плазмы.

Приравняв правые части выражений (6) и (4), находим

$$r_A = \sqrt{\frac{2E_0 I_0 \theta}{(1+n)\pi q}} \cdot \left(\frac{i_\theta}{I_0} \right)^{\frac{1+n}{2}}. \quad (7)$$

Здесь $E_0 = U_0/l_A$ – напряженность электрического поля лазерно-дугового разряда. Отметим, что значение $T_{A,av}$ слабо зависит от тока дуги и определяется в основном составом газа и электродов, поэтому подкоренное выражение в формуле (7) можно с достаточной для практики точностью считать не зависящим от тока состояния i_θ .

При постоянном токе $i_\theta = I_0$ значение $r_A = r_{A0}$, и из формулы (7) следует, что

$$r_A(t) = r_{A0} \left(\frac{i_\theta(t)}{I_0} \right)^{\frac{1+n}{2}}. \quad (8)$$

Выражение (8) задает закон изменения радиуса лазерно-дугового разряда r_A во времени и может использоваться при исследовании его динамического силового воздействия.

Анализ динамического силового воздействия лазерно-дугового разряда. С учетом формулы (8) выражение для давления (1) по оси лазерно-дугового разряда p_{\max} в динамике можно переписать в виде

$$p_{\max}(t) = \frac{\mu_0}{4\pi^2} \cdot \frac{i^2(t)}{r_{A0}^2} \cdot \left(\frac{I_0}{i_\theta(t)} \right)^{1+n}. \quad (9)$$

Этим выражением можно воспользоваться для анализа силовых характеристик автоколебательных режимом лазерно-дугового разряда, т. к. при исследовании электрических цепей с лазерно-дуговым разрядом [6] нами были получены временные зависимости как тока разряда $i(t)$, так и его тока состояния $i_\theta(t)$.

На рис. 1 и далее использованы безразмерные переменные [6]. Масштабы были следующие: для токов – I_0 , для времени – θ . Параметр Θ – безразмерная постоянная времени цепи обратной связи [6].

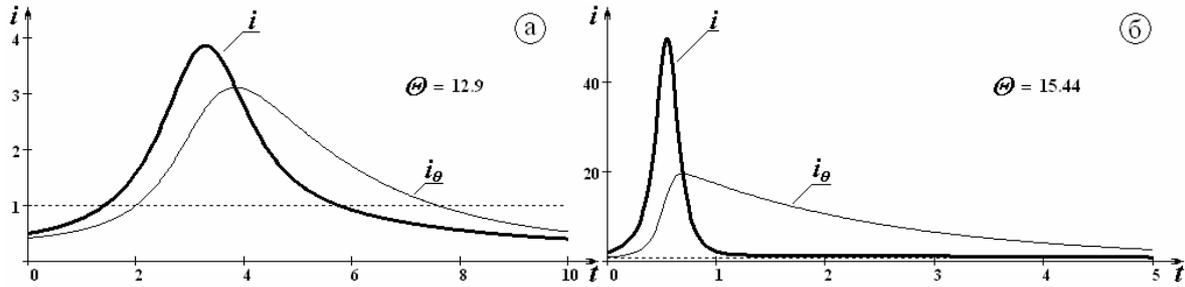


Рис. 1. Временные зависимости тока лазерно-дугового разряда $i(t)$ и его тока состояния $i_{\theta}(t)$: а) – колебания, близкие к гармоническим; б) – релаксационные колебания

Как видно из рис.1, ток состояния $i_{\theta}(t)$, которым согласно (8) определяется радиус разряда r_A , запаздывает по отношению к току разряда $i(t)$. Поэтому следует ожидать повышения давления при резком нарастании тока.

На рис. 2 изображена часть периода колебаний тока лазерно-дугового разряда $i(t)$, его радиуса $r_A(t)$ и давления на оси разряда $p_{max}(t)$. Масштабы на этом рисунке следующие: для радиуса – r_{A0} , для давления – $\mu_0 I_0^2 / 4\pi^2 r_{A0}^2$. Отметим, что если значение I_0 выбрать в качестве постоянного тока разряда, то с помощью рис. 2 удобно проводить сравнение колебательных режимов с режимом постоянного тока.

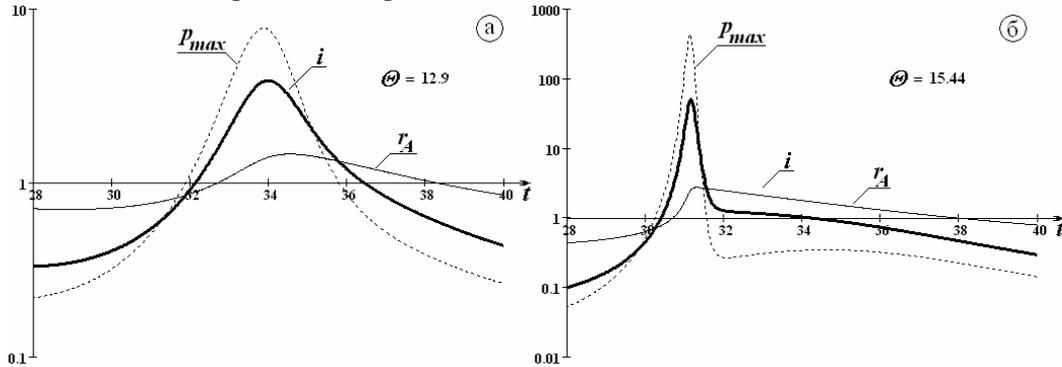


Рис. 2. Временные зависимости тока лазерно-дугового разряда $i(t)$, его радиуса $r_A(t)$ и давления на оси разряда $p_{max}(t)$: а) – колебания, близкие к гармоническим; б) – релаксационные колебания (ось ординат – логарифмическая)

Анализ кривых на рис. 2 подтверждает предположения, сделанные выше. Чем больше скорость нарастания тока разряда, тем больше амплитуда пика давления. Так амплитуда пика давления при релаксационных колебаниях (рис. 2, б) в 425 раз больше, чем давление разряда при постоянном токе. Амплитуда пика давления при колебаниях, близких к гармоническим (рис. 2, а) в 7,7 раз больше, чем давление разряда при постоянном токе. Объясняется это тем, что при релаксационных колебаниях за время нарастания фронта импульса тока радиус разряда изменяется незначительно.

Очевидно, силовое воздействие одного импульса колебаний тока лазерно-дугового разряда значительно превышает силовое воздействие этого разряда на постоянном токе. Однако такие инерционные объекты, как сварочная ванна, воспринимают не мгновенное, а усредненное воздействие.

На рис. 3 приведена зависимость среднего давления на оси лазерно-дугового разряда от постоянной времени цепи обратной связи Θ . Из него видно, что среднее давление при колебательном разряде может превышать это же давление разряда постоянного тока более чем в три раза. А это скажется на увеличении глубины проплавления, что характерно для процесса импульсно-дуговой сварки.

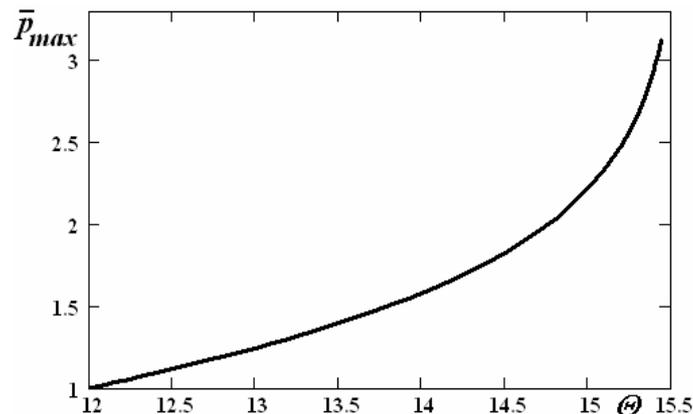


Рис. 3. Зависимость среднего давления на оси лазерно-дугового разряда от постоянной времени цепи обратной связи

Поддержка научных исследований. Научные исследования, результаты которых изложены выше, проведены при финансовой поддержке «Державного фонду фундаментальних досліджень України» в рамках совместного украинско-российского проекта ДФФД-РФФИ-2011 (грант Ф40.7/047).

Выводы. Знание закономерности изменения радиуса позволяет определить динамическое силовое воздействие при колебательных режимах горения лазерно-дугового разряда.

Давление по оси разряда на фронте импульса тока колебательного лазерно-дугового разряда гораздо больше, чем давление, создаваемое лазерно-дуговым разрядом постоянного тока, особенно, если колебания близки к релаксационным.

По своему силовому воздействию колебательный лазерно-дуговой разряд подобен известным процессам дуговой сварки модулированным током и импульсно-дуговой сварки.

Список использованных источников

1. Лазерно-дуговая сварка металлов / В. В. Башенко, С. Г. Горный, В. А. Лопота [и др.]. – Л.: Изд-во ЛДНТП, 1988. – 22 с.
2. Laser-arc discharge: Theory and applications / V. S. Gvozdetzky, I. V. Krivtsun, M. I. Chizhenko, et al. // Welding and Surfacing Rev. – Harwood Academic Publ, 1995. – Vol. 3. –148 p.
3. Сом А. И. Лазер + плазма: поиск новых возможностей в наплавке / А. И. Сом, И. В. Кривцун // Автоматическая сварка. – 2000. – № 12. – С.36-41.
4. Bushma A. I. Feedbacks Impact on the Work Stability of Laser-Arc Discharge Power Source / A. I. Bushma, V. N. Sydorets // Технічна електродинаміка. – 2011. – Ч. 1. – С. 219-222. – (Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність).
5. Бушма А. И. Квазистатические вольтамперные характеристики комбинированного лазерно-дугового разряда / А. И. Бушма, В. Н. Сидорец // Технічна електродинаміка. – 2010. – Ч. 1. – С. 201-204. – (Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність).
6. Бушма А. И. Амплитудно-частотные характеристики автоколебаний в цепи с лазерно-дуговым разрядом / А. И. Бушма, В. Н. Сидорец // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 3. – С. 15-18.
7. Лебедев В. К. Силовое воздействие сварочной дуги / В. К. Лебедев, И. В. Пентегов //Автоматическая сварка. –1981. – № 1. – С. 7-15.
8. Bushma A. I. Common approach to modeling the arc blown by gas and combined laser-arc discharge / A. I. Bushma // Технічна електродинаміка. – 2011. – Ч. 1. – С. 234-237. – (Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність).
9. Пентегов И. В. Энергетические параметры в математической модели динамической сварочной дуги / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец // Автоматическая сварка. – 1988. – № 11. – С. 36-40.