

УДК 621.791.75:621.3.014.33

РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АРГОНОВОЙ ДУГИ С ТУГОПЛАВКИМ КАТОДОМ*

**В.Н. СИДОРЕЦ, И.В. КРИВЦУН, В.Ф. ДЕМЧЕНКО, И.В. КРИКЕНТ, Д.В. КОВАЛЕНКО,
И.В. КОВАЛЕНКО, А.Г. ПАВЛОВ**

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Для обоснованного выбора оптимальных режимов импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом необходимо исследовать динамику горения импульсной дуги. Предложенная ранее модель нестационарной дуги с распределенными параметрами из-за больших вычислительных затрат позволяет рассмотреть воздействие на дугу лишь единичного импульса тока, тогда как практический интерес представляет исследование динамических характеристик дуги при подаче пачек высокочастотных импульсов сварочного тока. В связи с этим представляет интерес разработка динамической модели дуги с сосредоточенными параметрами, которая не имеет ограничений с точки зрения объема вычислений и позволит с достаточной точностью проследить динамику изменения характеристик дуги с тугоплавким катодом при высокочастотной модуляции тока. Для сравнения эти же данные были получены расчетным методом на основе модели с распределенными параметрами. Постоянная времени столба дуги определялась исходя из расчетных данных динамики изменения напряжения на дуге, полученных при помощи модели с распределенными параметрами. В совокупности проведенный комплекс расчетных и экспериментальных исследований позволил отработать алгоритм использования модели с сосредоточенными параметрами и идентифицировать их. Приведены результаты экспериментальных исследований динамики изменения тока и напряжения дуги при высокочастотной импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом, которые сопоставляются с результатами расчета по модели с сосредоточенными параметрами. Библиогр. 14, табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: импульсно-дуговая сварка, сварка неплавящимся электродом, высокочастотные импульсы, динамические характеристики дуги, нестационарная дуга, столб дуги, аргоновая дуга, тугоплавкий катод

Сварка неплавящимся электродом в среде инертных газов (ТИГ-процесс) широко применяется при изготовлении ответственных конструкций в атомном и химическом машиностроении, авиа- и ракетостроении, пищевой и других отраслях промышленности. Недостатком ТИГ-сварки является низкая производительность, обусловленная недостаточной проплавляющей способностью дуги при данном способе сварки. Для устранения этого недостатка в настоящее время используются различные способы активации процессов переноса энергии в дуговой плазме и сварочной ванне, такие как: сварка по слою активизирующего флюса (процесс А-ТИГ), гибридная сварка (ТИГ + лазер) и др. [1–4]. В работе [5] методом математического моделирования дуги с тугоплавким катодом установлено, что при подаче импульса сварочного тока с высокой скоростью его изменения на переднем фронте импульса наблюдается эффект существенного повышения плотности тока и плотности теплового потока на аноде по сравнению с соответствующими характеристиками стационарной дуги. Технологическим

следствием, которое можно ожидать в результате интенсификации теплового и динамического воздействия импульсной дуги на расплав, может быть повышение глубины проплавления и увеличение объема расплавленного металла по сравнению со сваркой на постоянном токе.

Отмеченная особенность динамики горения дуги в импульсном режиме свидетельствует о том, что при соответствующем выборе параметров режима высокочастотная модуляция сварочного тока может выступать в качестве еще одного средства активации процессов переноса энергии в дуговой плазме и свариваемом металле. Это обуславливает интерес к дальнейшим исследованиям динамических характеристик дуги с тугоплавким катодом при сварке в импульсном режиме. Первичным инструментом, который широко используется при анализе сварочной дуги, является ее вольт-амперная характеристика (ВАХ). Исследование связи между током и напряжением при сварке неплавящимся электродом представляет интерес как в случае сварки на постоянном токе, так и в случае

* По материалам доклада, представленного на VII Международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», 15–19 сентября 2014, г. Одесса, Украина.

высокочастотной импульсной модуляции тока, при которой проявляются описанные выше динамические эффекты. Настоящая работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию статических и динамических ВАХ аргоновой дуги с тугоплавким катодом.

Модель нестационарной дуги, предложенная в работе [6] и реализованная в работе [5], базируется на описании процессов энерго-, массо- и электропереноса в плазме столба и анодной области нестационарной дуги с тугоплавким катодом (модель с распределенными параметрами). Такой подход требует значительных вычислительных ресурсов для расчета тепловых, электромагнитных и газодинамических характеристик дуговой плазмы, что ограничивает область применения модели рассмотрением лишь одиночных импульсов тока. В то же время практический интерес представляет изучение влияния пачек импульсов различной формы и частоты.

1. Основные определения. При определении вольт-амперной характеристики электрической дуги устанавливается связь между током I и напряжением U на дуге. Как известно, напряжение на дуге является суммой трех составляющих: катодного падения потенциала U_c , напряжения на столбе дуги U_p и анодного падения потенциала U_a , которое для большинства электрических дуг атмосферного давления, в т.ч. для сварочных дуг, отрицательно [7]. Поскольку потенциалы на поверхности металлического катода и анода можно с достаточной точностью считать постоянными (из-за высокой электрической проводимости металлов), полное напряжение на дуге U можно определять (измерять) как разность потенциалов поверхности анода и катода, т.е. полагать $U = \varphi_a - \varphi_c$, где φ_a , φ_c — потенциалы рабочих поверхностей анода и катода соответственно. Однако такое общепринятое определение напряжения, как интегральной электрической характеристики дугового разряда, не годится для определения его составляющих, а именно катодного U_c и анодного U_a падений потенциала, а также напряжения на столбе дуги U_p . Это обусловлено тем обстоятельством, что согласно расчетам характеристик плазмы аргоновой дуги с тугоплавким катодом и водоохлаждаемым [8] или испаряющимся [9] анодом, а особенно дуги при гибридной (ТИГ + CO₂-лазер) сварке [10], потенциал плазмы на границе анодного слоя φ_{ap} равно как и потенциал плазмы на границе катодного слоя φ_{cp} , оказываются переменными вдоль границ Γ_{ap} и Γ_{cp} , разделяющих анодную и катодную области со столбом дуги, т.е. указанные границы не являются эквипотенциальными.

Для определения эффективных (интегральных) значений анодного падения потенциала $\langle U_a \rangle$, ко-

торое в сумме с определенными соответствующим образом значениями катодного падения $\langle U_c \rangle$ и напряжения на столбе $\langle U_p \rangle$ должно давать полное напряжение на дуге $U = \langle U_c \rangle + \langle U_p \rangle + \langle U_a \rangle$, поступим следующим образом. Поскольку плотность электрического тока в столбе дуги определяется выражением $\vec{j} = -\sigma \text{grad} \varphi$, где σ — электропроводность, φ — потенциал электрического поля в плазме столба дуги, из уравнения неразрывности $\text{div} \vec{j} = 0$ вытекает следующее интегральное соотношение

$$\int_{\Omega} \frac{|\vec{j}|^2}{\sigma} dV = - \int_{\Gamma} \varphi j_n dS, \quad (1)$$

где Ω — область, занимаемая плазмой столба дуги; Γ — ее граница; j_n — проекция вектора плотности тока на внешнюю нормаль \vec{n} к границе Γ . Представим границу Γ в виде: $\Gamma = \Gamma_{ap} + \Gamma_{cp} + \Gamma_{bp}$, где Γ_{bp} — часть границы Γ , через которую не протекает ток ($j_n|_{\Gamma_{bp}} = 0$). Тогда из (1) получим

$$\int_{\Omega} \frac{|\vec{j}|^2}{\sigma} dV = \int_{\Gamma_{ap}} \varphi j_n d\Gamma_{ap} - \int_{\Gamma_{cp}} \varphi j_n d\Gamma_{cp}, \quad (2)$$

где $\vec{n}' = -\vec{n}$. Выражение в левой части (2) есть тепловая мощность, выделяющаяся в столбе дуги. В соответствии с интегральным законом Джоуля–Ленца запишем:

$$\int_{\Omega} \frac{|\vec{j}|^2}{\sigma} dV = I \cdot \langle U_p \rangle,$$

где под

$$\langle U_p \rangle = \frac{1}{I} \int_{\Omega} \frac{|\vec{j}|^2}{\sigma} dV$$

будем понимать эффективное падение напряжения на столбе дуги. Так как поверхности Γ_{ap} и Γ_{cp} не являются эквипотенциальными, введем для них понятия эффективных значений потенциалов Φ_{ap} и Φ_{cp} следующим образом:

$$\Phi_{ap} = \frac{1}{I} \int_{\Gamma_{ap}} \varphi j_n d\Gamma_{ap}; \quad \Phi_{cp} = \frac{1}{I} \int_{\Gamma_{cp}} \varphi j_n d\Gamma_{cp}. \quad (3)$$

Тогда из (2) падение напряжения на столбе дуги можно определить как разность эффективных значений потенциалов Φ_{ap} и Φ_{cp} , т.е. положить $\langle U_p \rangle = \Phi_{ap} - \Phi_{cp}$. Воспользовавшись (3), определим эффективные анодное $\langle U_a \rangle$ и катодное $\langle U_c \rangle$ падения в виде:

$$\langle U_a \rangle = \varphi_a - \Phi_{ap}; \quad \langle U_c \rangle = \Phi_{cp} - \varphi_c.$$

В рамках данных определений можно получить стандартное выражение для напряжения на дуге в виде суммы падений напряжений на отдельных участках дугового разряда:

$$U = \langle U_c \rangle + \langle U_p \rangle + \langle U_a \rangle = \varphi_a - \varphi_c, \quad (4)$$

где следует принимать во внимание тот факт, что эффективное анодное падение напряжения является отрицательным.

2. Статические вольт-амперные характеристики аргоновой дуги с тугоплавким катодом. Рассмотрим результаты экспериментальных измерений статической ВАХ дуг длиной $l = 1,5$ и $3,0$ мм, горящих на медный водоохлаждаемый анод. На рис. 1 в виде отдельных маркеров приведены экспериментальные данные, штриховыми линиями показаны аппроксимации этих данных рядом Лорана, коэффициенты которого представлены в таблице:

$$U(I) = \sum_{j=1}^{j=1} a_j \left(\frac{I}{100} \right)^j, \quad (5)$$

где U [В]; I [А].

Для теоретической оценки составляющих напряжения на дуге, входящих в формулу (4), воспользуемся результатами расчетов [8] распределенных характеристик стационарной дуги длиной $3,0$ мм, выполненных в диапазоне токов $I = 50 \dots 250$ А, на основе модели работы [6]. На рис. 2 кривыми с маркерами представлены зависимости от тока дуги анодного падения потенциала $\langle U_a \rangle$ и суммарного напряжения на столбе и анодной области дуги $\langle U_{pa} \rangle = \langle U_p \rangle + \langle U_a \rangle$, вычисленных по разнице эффективных (интегральных) значений потенциалов на соответствующих поверхностях. На этом же рисунке кривыми без маркеров показаны падения напряжения U_{a0} , $U_{pa0} = U_{p0} + U_{a0}$, определенные как разности осевых значений соответствующих потенциалов. Как следует из представленных кривых, погрешность в определении напряжения на столбе дуги и падения потенциала в анодном слое двумя рассмотренными способами составляет величину порядка 10 %, тем не менее, при проведении дальнейшего анализа будем использовать введенные в первом разделе данной статьи эффективные значения, при записи которых знак усреднения $\langle \rangle$ будем опускать.

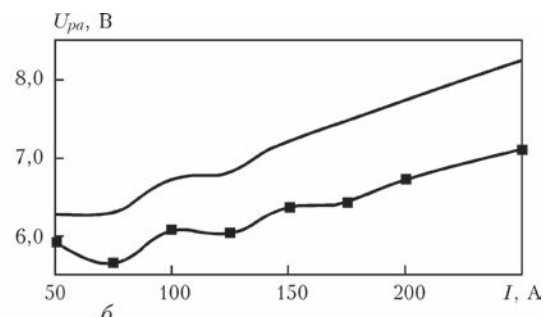
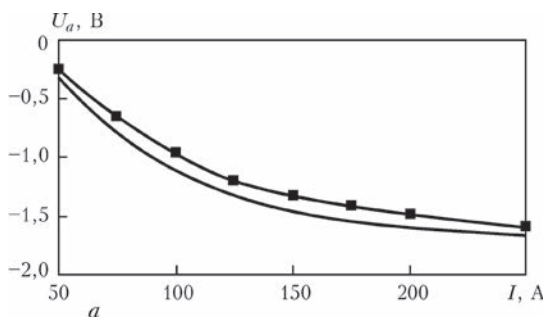


Рис. 2. Расчетные зависимости анодного падения потенциала (а) и суммарного напряжения на столбе и анодной области (б) от тока дуги, полученные с использованием модели стационарной дуги с распределенными параметрами

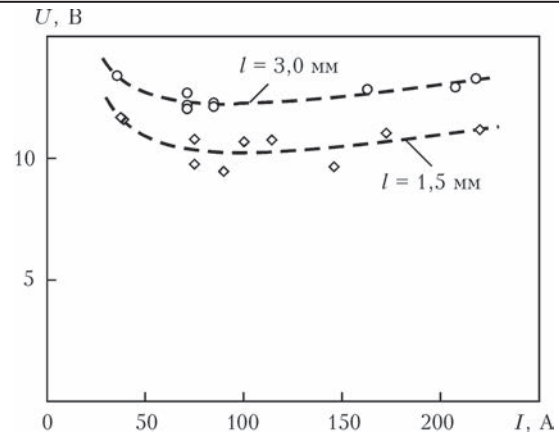


Рис. 1. Экспериментальные данные и аппроксимации статических ВАХ аргоновой дуги длиной 1,5 и 3,0 мм с тугоплавким катодом и медным водоохлаждаемым анодом

Коэффициенты аппроксимации

Длина дуги l , мм		1,5	3,0
Коэффициенты аппроксимации	a_{-1}	1,394283	1,113619
	a_0	7,343352	9,765307
	a_1	1,443792	1,333032

В модели [6] в явном виде не рассматривается катодная область дуги, поэтому теоретически оценить величину катодного падения потенциала по данным расчетов, выполненных в работе [8], не представляется возможным.

Для нахождения U_c воспользуемся экспериментальными данными (см. рис. 1) и вычислим катодное падение напряжения как разность между экспериментально определенной величиной U и рассчитанным эффективным напряжением на столбе и анодной области дуги $U_{pa} = U_p + U_a$, приведенными на рис. 3. Определенное таким образом изменение эффективного катодного падения U_c от тока дуги показано на рис. 4. На этом же рисунке представлены расчетные данные о величине катодного падения напряжения, полученные в докладе [8], исходя из приближенной модели катодного слоя. Сравнение этих результатов указывает на качественно аналогичный характер зависимости катодного падения от тока, хотя данные и отличаются на величину порядка 1,3 В. Полученные таким образом расчетно-экспериментальные данные о зависимости $U_c(I)$ (кривая 2 на рис. 4) будут

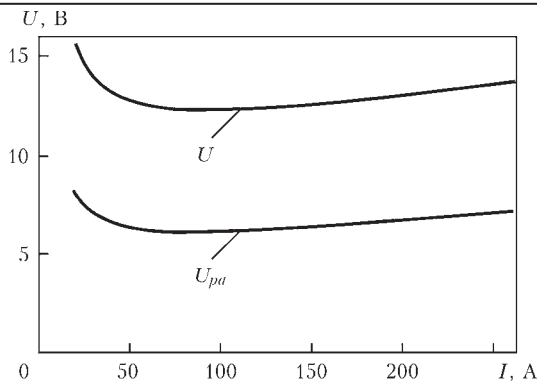


Рис. 3. Зависимость полного напряжения на дуге U (эксперимент) и суммарного эффективного напряжения на столбе и анодной области дуги U_{pa} (расчет) от тока

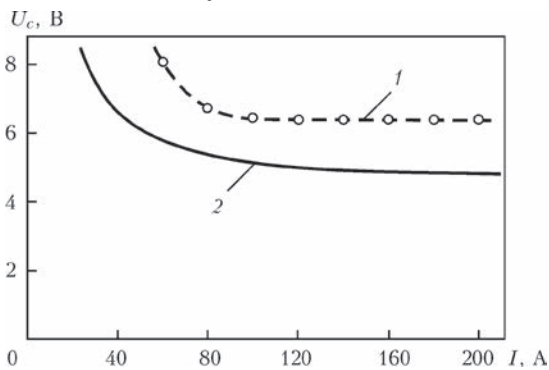


Рис. 4. Зависимость катодного падения напряжения от тока дуги: 1 — по данным работы [11]; 2 — расчет в соответствии с данными, приведенными на рис. 3

использоваться для определения динамической ВАХ импульсной дуги.

3. Динамическая модель дуги с сосредоточенными параметрами. В качестве альтернативы модели нестационарной дуги с распределенными параметрами [5, 6] сформулируем уравнения динамической модели дуги с сосредоточенными параметрами, которые допускают аналитическое решение, не связанное с громоздкими вычислениями.

В рамках данной модели столб дуги рассматривается как некий объект, который подчиняется закону сохранения энергии [12]

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_{\theta}, \tag{6}$$

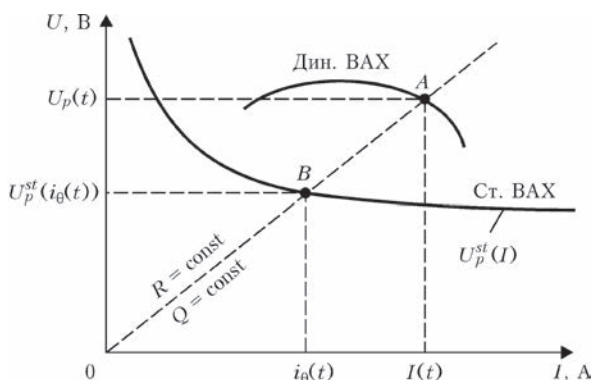


Рис. 5. Определение падения напряжения на столбе дуги в динамике с использованием понятия тока состояния дуги i_{θ}

где Q — внутренняя энергия столба дуги; P, P_{θ} — подводимая и отводимая мощности, соответственно. Используя в качестве исходных данных статическую вольт-амперную характеристику столба дуги $U_p^{st}(I)$ и соответствующую постоянную времени θ , эта модель описывает динамику дуги при любом изменении тока $I(t)$

$$U_p(t) = \frac{U_p^{st}(i_{\theta}(t))}{i_{\theta}(t)} I(t). \tag{7}$$

В формуле (7) используется понятие тока состояния i_{θ} , которое иллюстрируется с помощью рис. 5. Каждой точке динамической ВАХ столба дуги с координатами (U_p, I) соответствует только одна точка статической ВАХ с координатами $(U_p^{st}(i_{\theta}), i_{\theta})$, причем внутренняя энергия Q (и сопротивление R) столба дуги в статическом и динамическом состояниях равны.

Формула (7) входит в уравнения, которые соответствуют законам Кирхгофа, описывающим электрическую цепь. Эти уравнения дополняются уравнением динамической модели столба дуги, которое является электротехническим аналогом [12] уравнения (6)

$$\theta \frac{di_{\theta}^2}{dt} + i_{\theta}^2 = I^2. \tag{8}$$

Отметим, что статическую вольт-амперную характеристику столба дуги можно как измерять экспериментально, так и рассчитывать теоретически, например, с помощью модели с распределенными параметрами.

Полное напряжение на дуге определяли по формуле

$$U(I) = \frac{U_p^{st}(i_{\theta})}{i_{\theta}} I + U_c(I) + U_a(I), \tag{9}$$

где $U_a(I)$ — эффективное анодное падение потенциала, которое может быть определено с помощью модели с распределенными параметрами; $U_c(I)$ — эффективное катодное падение потенциала, которое может быть определено по предложенной расчетно-экспериментальной методике. Таким образом, в рамках динамической модели дуги падение напряжения на нестационарной дуге рассчитывается как функция текущей величины тока в импульсе. При этом в качестве априори заданных параметров динамической модели дуги с сосредоточенными параметрами используются данные о зависимости анодного и катодного падений потенциала от тока, полученные экспериментально или с помощью модели с распределенными параметрами.

4. Динамические вольт-амперные характеристики аргоновой дуги с тугоплавким катодом. Алгоритм применения модели с со-

средоточенными параметрами требует ее предварительной калибровки, а именно определения постоянной времени θ . Для этого необходимо выбрать какой-нибудь динамический режим горения дуги, который описывается обеими моделями и сравнивать их результаты. Достигая максимального совпадения результатов подбором постоянной времени θ , можно определить значение последней.

В данной работе рассматривалось воздействие на дугу трапецидальных импульсов тока с различными длительностями фронтов. Расчеты проводились для аргоновой дуги длиной 3,0 мм с тугоплавким катодом и водоохлаждаемым анодом. Параметры импульса варьировались следующим образом: длительность переднего и заднего фронтов импульса 20, 100, 200 мкс. Предполагалось, что после подъема (спада) тока дуга горит при постоянном токе, соответствующем окончанию переходного процесса, – вплоть до установления стационарного состояния. Катодное и анодное падения потенциала в зависимости от текущей величины тока выбирались в соответствии с данными рис. 2 и 4. Результаты расчета динамической ВАХ для моделей дуги с распределенными параметрами представлены на рис. 6.

Кратко опишем, как рассчитывались динамические ВАХ с помощью модели дуги с сосредоточенными параметрами при подаче трапецидального импульса тока (см. рис. 7).

Подобное воздействие можно рассматривать поэтапно, как последовательное воздействие фронтов импульсов (длительностями t_{f1} и t_{f2}) и постоянного тока (длительностями импульса t_i и t_p). Общие решения дифференциального уравнения (8) для этих этапов, имеют вид

$$i_{\theta C}^2(t, I_{\theta}, I_1) = I_1^2 + (I_{\theta}^2 - I_1^2)e^{-t/\theta}; \quad (10)$$

$$i_{\theta F}^2(t, I_{\theta}, I_1, I_2, t_f) = I_{\theta}^2 e^{-t/\theta} + I_1^2 (1 - e^{-t/\theta}) - 2 \frac{\theta}{t_f} I_1 (I_2 - I_1) \left(1 - \frac{t}{\theta} - e^{-t/\theta} \right) + 2 \left(\frac{\theta}{t_f} \right)^2 \left(1 - \frac{t}{\theta} + \frac{t^2}{2\theta^2} - e^{-t/\theta} \right), \quad (11)$$

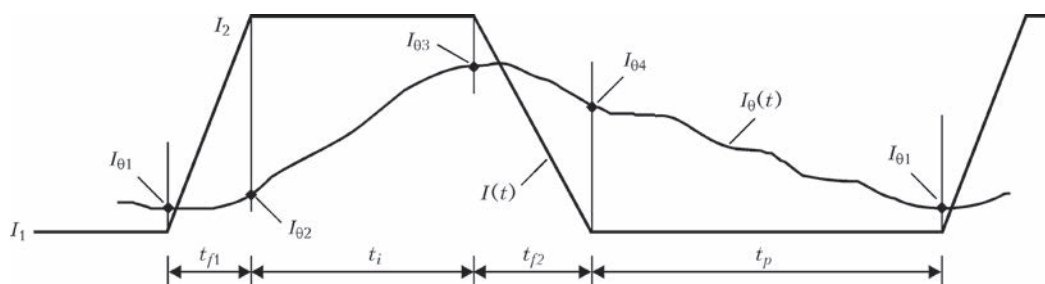


Рис. 7. Исследование воздействия на дугу трапецидального импульса тока с помощью метода припасовывания

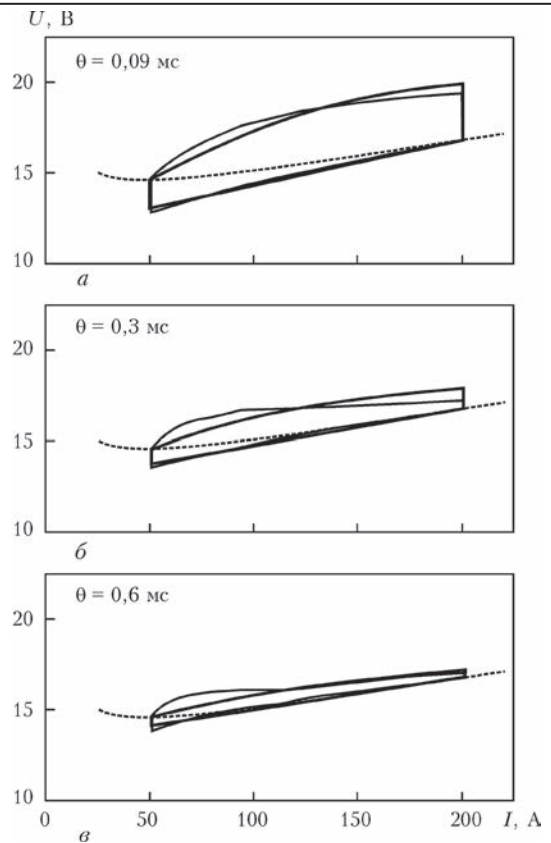


Рис. 6. Динамические вольт-амперные характеристики дуги при различных длительностях фронтов импульса: *a* — длительность фронта 20 мкс; *б* — длительность фронта 100 мкс; *в* — длительность фронта 200 мкс; пунктир — статическая ВАХ дуги; сплошная тонкая — динамическая ВАХ дуги (модель с распределенными параметрами); сплошная жирная — динамическая ВАХ дуги (модель с сосредоточенными параметрами)

где t_f — длительность фронта; I_0 — начальное значение тока состояния на каждом этапе.

Для получения стационарного решения применяли метод припасовывания, с помощью которого получили условия на границах этапов

$$i_{\theta F}(t_{f1}, I_{\theta 1}, I_1, I_2, t_{f1}) = I_{\theta 2}; \quad i_{\theta C}(t_i, I_{\theta 2}, I_2) = I_{\theta 3}; \quad (12)$$

$$i_{\theta F}(t_{f2}, I_{\theta 3}, I_2, I_1, t_{f2}) = I_{\theta 4}; \quad i_{\theta C}(t_p, I_{\theta 4}, I_1) = I_{\theta 1}.$$

Матричная форма записи придает решениям уравнений (12) компактный вид

$$\begin{pmatrix} I_{\theta 1}^2 \\ I_{\theta 2}^2 \\ I_{\theta 3}^2 \\ I_{\theta 4}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -e^{-t_{f1}/\theta} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -e^{-t_i/\theta} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -e^{-t_{f2}/\theta} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -e^{-t_p/\theta} \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} i_{\theta f}^2(t_{f1}, 0, I_1, I_2, t_{f1}) \\ i_{\theta c}^2(t_i, 0, I_2) \\ i_{\theta f}^2(t_{f2}, 0, I_2, I_1, t_{f2}) \\ i_{\theta c}^2(t_p, 0, I_1) \end{pmatrix} \quad (13)$$

Подставляя значения токов состояния на границах этапов из формулы (13) в выражения (10) и (11), получим зависимости изменения тока состояния от времени при воздействии трапецидального импульса на дугу.

Если длительность импульса и паузы взять достаточно большими (чтобы дуга успевала достичь стационарного состояния), результаты, полученные с помощью модели с сосредоточенными параметрами, можно сравнивать с ре-

зультатами, полученными для одиночных фронтов (см. рис. 6) с помощью модели с распределенными параметрами.

Значения постоянной времени θ в модели с сосредоточенными параметрами, полученные сравнением двух моделей, указаны на этом рисунке. Заметим, что постоянная времени убывает с уменьшением длительности фронтов импульса. Характерной особенностью ВАХ динамической дуги является то, что она представляется в виде петли гистерезиса, в которой верхняя и нижняя кривые соответствуют переднему и заднему фронтам импульса, а вертикальные отрезки — переходу в стационарное состояние дуги (для сопоставления на этих же рисунках нанесена статическая ВАХ). Динамическая ВАХ в виде петли гистерезиса была получена экспериментально в работах [10, 11]. Физической причиной возникновения такой петли является различная степень инерционности процессов переноса энергии, импульса и заряда при подъеме и спаде тока [5]. Отметим, что с увеличением длительности импульса размах петли гистерезиса уменьшается и ВАХ динамической дуги приближается к ВАХ статической дуги.

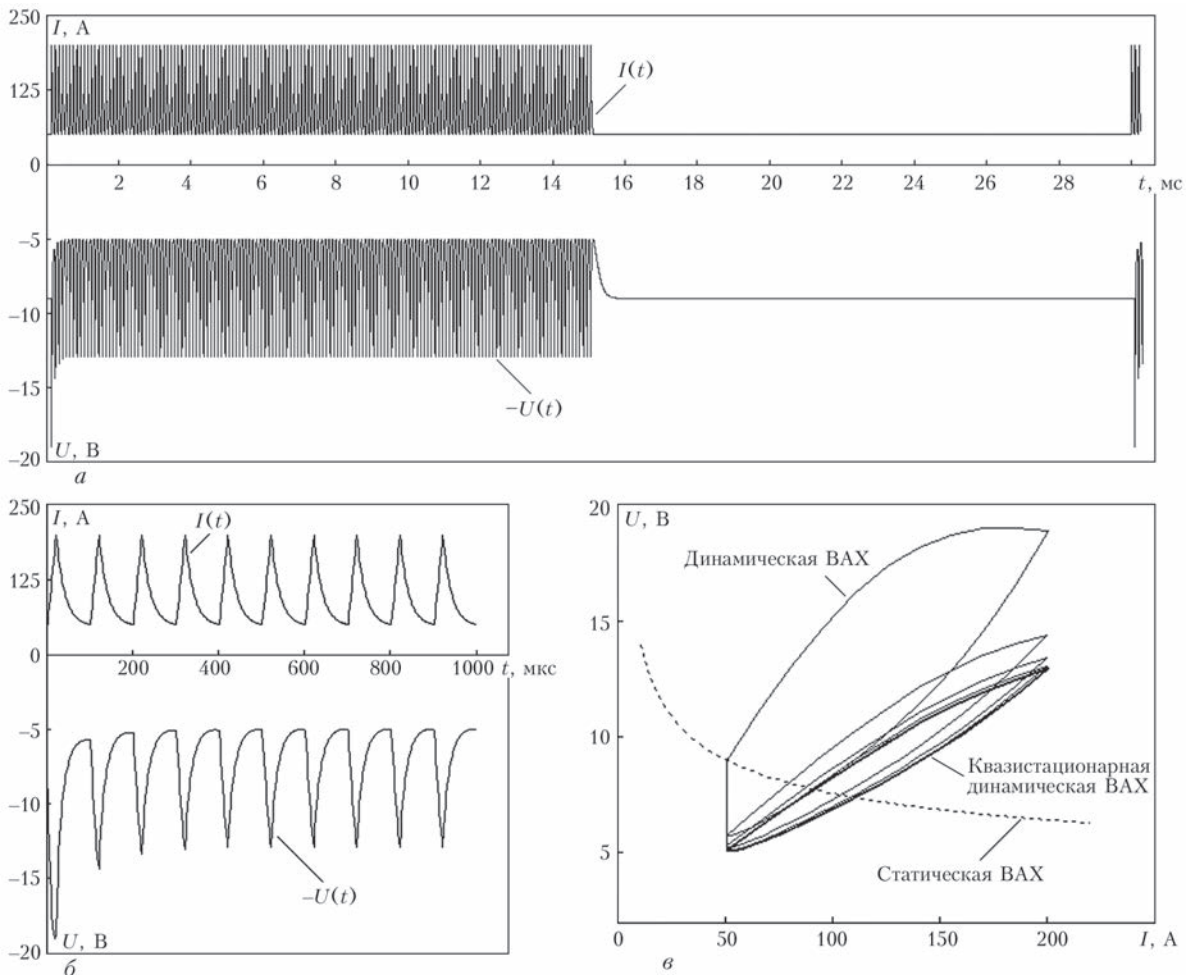


Рис. 8. Воздействие на дугу пакетов высокочастотных импульсов тока: а — временные зависимости тока дуги и напряжения на ней; б — воздействие нескольких начальных импульсов пакки (укрупненный масштаб рисунка а); в — расчетная динамическая ВАХ дуги при таком воздействии

После отработки модели динамической дуги с сосредоточенными параметрами, описанной в разделе 3, и калибровки постоянной времени, эта модель была применена для расчета динамической ВАХ при подаче пачек высокочастотных импульсов. Экспериментально импульсы генерировались при помощи устройства, разработанного в отделе физики газового разряда и техники плазмы ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. Устройство генерирует пачки ВЧ импульсов в диапазоне частот 5...25 кГц с формой близкой к треугольной. Частота следования пачек от 1 до 75 Гц, заполнение пачки ВЧ импульсами от 1 до 99 %.

Были проведены экспериментальные исследования воздействия на дугу пачек высокочастотных импульсов и получены осциллограммы изменения во времени тока и напряжения дуги. Теоретическое исследование такого же воздействия с помощью модели с сосредоточенными параметрами показало (см. рис. 8) хорошее совпадение результатов с экспериментальными данными, что свидетельствует об адекватности предложенного описания переходных процессов в дуге при высокочастотной модуляции сварочного тока. Данные рис. 8, в свидетельствуют о том, что реакция дуги на шесть-восемь начальных импульсов пачки отличается от реакции на все остальные импульсы. Только по прошествии этого переходного процесса формируется квазистационарная динамическая ВАХ дуги.

Выводы

С учетом неэквипотенциальности границ столба электрической дуги с ее приэлектродными областями, введено понятие эффективных значений составляющих напряжения на дуге, а именно: катодного и анодного падений потенциала, а также напряжения на столбе. На основе модели с распределенными параметрами вычислены эффективные значения падения напряжения на столбе и анодном слое аргоновой дуги с тугоплавким катодом и водоохлаждаемым анодом. Эффективное катодное падение потенциала в такой дуге определено расчетно-экспериментальным методом.

Показано, что при соответствующем выборе постоянной времени результаты расчетов переходных процессов в импульсной дуге с тугоплавким катодом на основе модели с сосредоточенными параметрами достаточно точно соответствуют расчетным данным, полученным при помощи модели с распределенными параметрами. Динамическая модель дуги с сосредоточенными параметрами не требует больших вычислительных ресурсов, что делает ее перспективной для исследова-

ния переходных процессов при подаче пачек высокочастотных импульсов.

На основе сравнительного анализа моделей с сосредоточенными и распределенными параметрами, описывающих переходные процессы в импульсной дуге с тугоплавким катодом, получены вольт-амперные характеристики такой дуги. Показано, что с увеличением крутизны фронтов импульса тока размах петли гистерезиса динамической вольт-амперной характеристики дуги увеличивается.

При высокочастотной модуляции тока дуги установление квазистационарной вольт-амперной характеристики импульсной дуги с тугоплавким катодом достигается после прохождения 6...8 импульсов.

1. Гуревич С.М., Замков В.Н., Кушницренко Н.А. Повышение эффективности проплавления титановых сплавов при аргодуговой сварке // Автомат. сварка. – 1965. – № 9. – С. 1–4.
2. Юценко К.А., Коваленко Д.В., Коваленко И.В. Применение активаторов при дуговой сварке вольфрамовым электродом в инертных газах (А-ТИГ) сталей и сплавов // Там же. – 2001. – № 7. – С. 37–43.
3. Steen W.M., Eboo M. Arc augmented laser welding // Metal Construction. – 1979. – № 7. – P. 332–335.
4. Lu S., Fujii H., Nogi K. Marangoni convection and weld shape variations in Ar-O₂ and Ar-CO₂ shielded GTA welding // Materials Science and Engineering: A. – 2004. – **380**, № 1-2. – P. 290–297.
5. Кривцун И.В., Крикент И.В., Демченко В.Ф. Моделирование динамических характеристик импульсной дуги с тугоплавким катодом // Автомат. сварка. – 2013. – № 7. – С. 14–25.
6. Кривцун И.В., Демченко В.Ф., Крикент И.В. Модель процессов тепло-, массо- и электропереноса в анодной области и столбе сварочной дуги с тугоплавким катодом // Там же. – 2010. – № 6. – С. 3–11.
7. Sanders N.A., Pfender E. Measurement of anode falls and anode heat transfer in atmospheric pressure high intensity arcs // J. of Appl. Phys. – 1984. – **55**, № 3. – P. 714–722.
8. Крикент И.В., Кривцун И.В., Демченко В.Ф. Моделирование процессов тепло-, массо- и электропереноса в столбе и анодной области дуги с тугоплавким катодом // Автомат. сварка. – 2012. – № 3. – С. 7–11.
9. Крикент И.В., Кривцун И.В., Демченко В.Ф. Моделирование электрической дуги с тугоплавким катодом и испаряющимся анодом // Там же. – 2014. – № 9. – С. 19–26.
10. Взаимодействие излучения CO₂-лазера с плазмой аргоновой дуги при гибридной (лазер+ТИГ) сварке / И.В. Кривцун, И.В. Крикент, В.Ф. Демченко и др. // Там же. – 2015. – № 3-4. – С. 7–16.
11. Cathode Fall Voltage of TIG Arcs from a Non-equilibrium Arc Model / D. Uhrlandt, M. Baeva, R. Kozakov, G. Gött // IIV Essen, 12.09.2013, Group 212 – Physics of Welding. – 21 p.
12. Сидорец В.Н., Пентегов И.В. Детерминированный хаос в нелинейных цепях с электрической дугой. – Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2013. – 272 с.
13. Трофимов Н.М. Сеницкий Р.В. Динамические характеристики импульсной дуги при сварке в аргоне // Свароч. пр-во. – 1967. – № 8. – С. 18–19.
14. Соколов О.И., Гладков Э.А. Динамические характеристики свободной и сжатой сварочных дуг постоянного тока с неплавящимся электродом // Там же. – 1977. – № 4. – С. 3–5.

Поступила в редакцию 26.10.2015