



УДК 621.791

О ВЛИЯНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ В СВАРОЧНОЙ ЦЕПИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМА ДУГОВОЙ СВАРКИ

Г.А. ЦЫБУЛЬКИН

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Глубокое изучение влияния различного рода дестабилизирующих факторов на устойчивость протекания сварочного процесса является одной из основных задач при его роботизации. В статье исследуется влияние емкости («паразитной» или специально введенной в сварочную цепь) на устойчивость режима дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа. Показано, что при больших и средних сварочных токах, т. е. когда рабочая точка располагается на возрастающем или неизменном участке вольт-амперной характеристики дуги, наличие емкости в сварочной цепи не влияет на устойчивость установившегося режима дуговой сварки. В случае же малых токов, когда рабочая точка располагается на падающем участке этой характеристики, обеспечение устойчивости режима дуговой сварки возможно лишь при ограниченных значениях указанной емкости. Установленные критерии в виде алгебраических неравенств позволяют сравнительно просто оценивать область значений этой емкости, внутри которой гарантируются устойчивые режимы. Результаты, изложенные в данной статье, будут полезными при разработке роботизированных сварочных технологий и соответствующего технологического оборудования. Библиогр. 17, рис. 5.

Ключевые слова: роботизированная дуговая сварка, плавящийся электрод, электрическая емкость, установившиеся режимы, устойчивость, переходные процессы

В недавно опубликованной статье [1] рассмотрено влияние емкости на процессы, протекающие в электрической дуге, питаемой от источника постоянного тока. Для изучения этих процессов авторами использовалась схема замещения электрической дуги двухполюсником, включающим в себя дифференциальное сопротивление дуги и последовательно с ним включенной малой паразитной индуктивностью, зашунтированной активным сопротивлением, а параллельно двухполюснику подключена емкость.

В несколько ином аспекте рассматривалась подобная задача в фундаментальном труде А.А. Андропова, А.А. Витта и С.Э. Хайкина «Теория колебаний» [2]. Там в качестве примера исследовалась устойчивость установившихся режимов в электрической цепи с дугой, включенной последовательно с индуктивностью и зашунтированной емкостью (см. рис. 1). Сама же дуга рассматривалась как некоторый элемент электрической цепи, статическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) которой отображает основные свойства дуги и имеет, как известно [3–10], решающее значение для выбора способа ее питания и стабилизации.

В [2] получены условия асимптотической устойчивости установившихся режимов в виде следующих неравенств:

$$R + S_a > 0, \quad L + S_a RC > 0, \quad (1)$$

где $S_a = du_a/di$ — тангенс угла наклона ВАХ электрической дуги (дифференциальное сопротивление дуги) в окрестности точки, соответствующей установившемуся режиму, а смысл остальных

обозначений ясен из рисунка. Из выражений (1) непосредственно видно, что если $S_a \geq 0$, то оба неравенства будут выполнены и, следовательно, установившийся режим асимптотически устойчив при любых значениях емкости C . Если же $S_a < 0$ (падающий участок ВАХ дуги), то установившийся режим будет асимптотически устойчивым только для тех значений параметров цепи, которые удовлетворяют условиям

$$R > |S_a|, \quad C < \frac{L}{R|S_a|}. \quad (2)$$

Первое неравенство в (2) называют критерием Кауфмана [3, 8]; записывают его чаще в виде $|\partial u_R / \partial i| > |\partial u_a / \partial i|$, где u_R — падение потенциала на сопротивлении R .

Результаты, полученные в [2], относятся к случаю, когда длина электрической дуги в процессе ее горения остается неизменной (вольтова дуга). Возникает естественный вопрос: каково влияние емкости C на устойчивость процессов, протекающих в реальной сварочной цепи при дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитно-

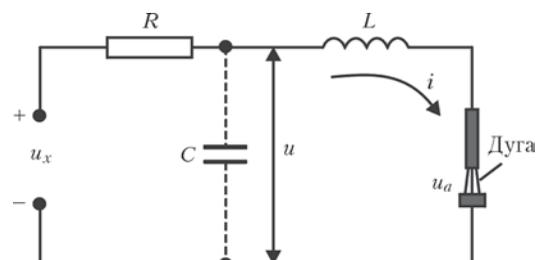


Рис. 1. Схема цепи с электрической дугой, сопротивлением R , индуктивностью L и емкостью C

© Г.А. Цыбулькин, 2015

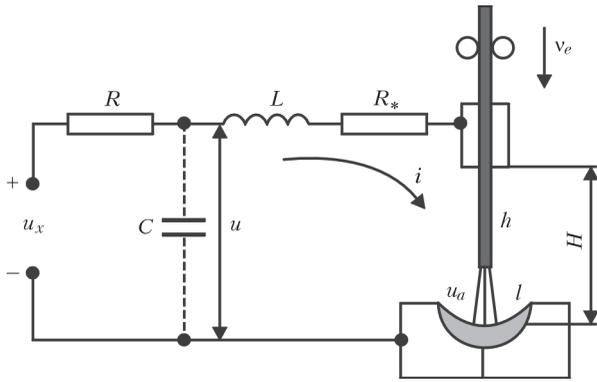


Рис. 2. Схема сварочной цепи с плавящимся электродом и емкостью C

го газа, когда длина дуги в принципе является переменной величиной? Судя по известным публикациям (см., например, [3–12] и приведенную там библиографию) этот вопрос до сих пор оставался недостаточно изученным. В силу того, что дуговая сварка плавящимся электродом в среде защитного газа является одной из доминирующих сварочных технологий, поставленный вопрос представляет практический интерес и заслуживает, на наш взгляд, детального изучения.

Рассмотрим схему сварочной цепи, изображенной на рис. 2. Она отличается от схемы на рис. 1 тем, что в ней используется плавящийся электрод, который подается в зону сварки с определенной скоростью v_e . Скорость подачи электрода $v_e = \text{const}$ и скорость его плавления $v_m = v_m(t)$ в произвольный момент времени t связаны с текущим значением вылета электрода $h = h(t)$ соотношением

$$h = h_0 + v_e t - \int_0^t v_m(t) dt, \quad (3)$$

где h_0 — начальное значение вылета электрода. Скорость плавления электрода v_m в свою очередь зависит от сварочного тока $i = i(t)$ и от теплофизических и геометрических свойств электрода. Эту зависимость часто аппроксимируют линейной функцией [5, 6, 13]

$$v_m = Mi, \quad (4)$$

где M — параметр, характеризующий указанные свойства.

Расстояние H между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны при роботизированной дуговой сварке поддерживается постоянным. Это расстояние, как видно из схемы, равно сумме текущих значений длины дуги $l = l(t)$ и вылета электрода $h = h(t)$, т. е.

$$H = l + h = \text{const}. \quad (5)$$

Соотношения (3)–(5) дополним зависимостью [12, 13]

$$u_a = u_0 + El + S_a i \quad (6)$$

и дифференциальными уравнениями

$$L \frac{di}{dt} + R_* i = u - u_a, \quad C \frac{du}{dt} = \frac{u_x - u}{R} - i, \quad (7)$$

составленными на основании рассматриваемой схемы и законов Кирхгофа.

В уравнениях (6) и (7) u_a — напряжение на дуге; u_0 — сумма приэлектродных падений напряжений; $E = du_a/dl$ — напряженность электрического поля в столбе дуги; R_* — суммарное сопротивление подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке сварочной горелки.

Исключив переменные i, h, v_m, u, u_a из системы уравнений (3)–(7), получим одно дифференциальное уравнение относительно переменной l :

$$CL \frac{d^3 l}{dt^3} + \left(\mu CR + \frac{L}{R} \right) \frac{d^2 l}{dt^2} + (1 + \mu + CEM) \frac{dl}{dt} + \frac{EM}{R} l = \frac{M}{R} (u_x - u_0) - (1 + \mu) v_e. \quad (8)$$

Все размерные параметры, фигурирующие в этом уравнении, положительны. Безразмерный параметр μ , равный

$$\mu = \frac{R_* + S_a}{R}, \quad (9)$$

может принимать как положительное, так и отрицательное значение в зависимости от знака S_a и от соотношения между $|S_a|$ и R_* в окрестности рабочей точки. В дальнейшем будем полагать, что $|\mu| < 1$. Установившееся значение длины дуги $l_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} l(t)$, т. е. ее значение при

$$\frac{d^3 l}{dt^3} = 0, \quad \frac{d^2 l}{dt^2} = 0, \quad \frac{dl}{dt} = 0,$$

определяется согласно (8) выражением:

$$l_\infty = \frac{u_x - u_0}{E} - \frac{R(1 + \mu)}{EM} v_e, \quad (10)$$

в которое, как мы видим, не входит емкость C .

Рассмотрим теперь, каково влияние оказывает эта емкость на устойчивость режима дуговой сварки. Введем переменную $\lambda = l - l_\infty$. С учетом этой переменной и выражений (8) и (10) получим уравнение

$$CL \frac{d^3 \lambda}{dt^3} + \left(\mu CR + \frac{L}{R} \right) \frac{d^2 \lambda}{dt^2} + (1 + \mu + CEM) \frac{d\lambda}{dt} + \frac{EM}{R} \lambda = 0, \quad (11)$$

описывающее переходный процесс в сварочной цепи.

Из этого уравнения непосредственно видно, что если будут выполняться условия

$$\begin{aligned} \mu CR^2 + L > 0, \quad 1 + \mu + CEM > 0, \\ \mu R^2 E M C^2 + \mu R^2 (1 + \mu) C + L(1 + \mu) > 0, \end{aligned} \quad (12)$$



то согласно критерию Гурвица [14] установившийся режим в рассматриваемой схеме будет асимптотически устойчив.

Рассмотрим отдельно три частных случая.

1) $S_a \leq 0$, т. е. ВАХ дуги в окрестности рабочей точки возрастает или остается неизменной (дуговая сварка на больших и средних токах). В этом случае согласно (9) $\mu > 0$. Легко убедиться, что при этом все три условия устойчивости (12) выполняются при любых значениях емкости C .

2) $S_a < 0$ и, кроме того, $|S_a| \leq R_*$. Это соответствует падающему участку ВАХ дуги (сварка на малых токах) и тому случаю, когда дифференциальное сопротивление дуги S_a по абсолютной величине меньше или равно суммарному сопротивлению подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке сварочной горелки. В этом случае $\mu \geq 0$. Следовательно, и теперь при любых значениях емкости C выполняются все три условия устойчивости (12).

3) $S_a < 0$, но в то же время $|S_a| > R_*$. В этом случае согласно (9) $\mu < 0$, а это означает, что установившийся режим (10) будет устойчивым только тогда, когда будут, согласно (12), выполняться следующие условия:

$$C < \frac{L}{|\mu|R^2}, \quad 1 + CEM > |\mu|, \quad \frac{EM}{(1-|\mu|)}C^2 + C < \frac{L}{|\mu|R^2}. \quad (13)$$

Рассматривая эти условия легко заметить, что при $|\mu| < 1$ второе условие выполняется всегда. Если при этом выполняется третье условие, то непременно будет выполняться и первое условие. Само же третье условие представляет собой алгебраическое неравенство второй степени относительно C . Его решение имеет вид

$$C < -a + \sqrt{a^2 + 2ab}, \quad (14)$$

где

$$a = \frac{1-|\mu|}{2EM}, \quad b = \frac{L}{|\mu|R^2}. \quad (15)$$

Неравенство (14) дает нам область возможных значений емкости C , при которых гарантируется устойчивость режима дуговой сварки, описываемого уравнением (8) при $\mu < 0$. В некоторых случаях, например, при экспресс-анализе устойчивости, вместо (14) удобнее использовать более простое соотношение

$$C < \sqrt{ab}, \quad (16)$$

которое при $b > 4a$ также удовлетворяет третьему неравенству из (13), но ограничивает несколько меньшую область значений емкости C по сравнению с «точной» областью, определяемой соотношением (14). Заметим, что условие $b > 4a$ можно

обеспечить путем подбора нужного значения R в формулах (15), которое фактически определяет крутизну ВАХ источника питания сварочной дуги в рассматриваемой рабочей точке: $R = |du/di|$.

Итак, при сварке на малых токах, когда ВАХ дуги имеет падающий участок и при этом $|S_a| > R_*$, для обеспечения устойчивости режима дуговой сварки кроме условия $|\mu| < 1$ должно выполняться еще и условие (14) или два более простых условия: $C < \sqrt{ab}$ и $b > 4a$. В последнем случае условия устойчивости с учетом (15) и (16) можно записать в окончательном виде

$$|\mu| < 1, \quad \frac{LEM}{2|\mu|} \\ C^2 < \frac{L(1-|\mu|)}{2R^2|\mu|EM}. \quad (17)$$

Первое условие из (17) при $R_* = 0$ сводится, согласно (9), к критерию Кауфмана $|S_a| < R$, т. е. является некоторым уточнением этого критерия. Второе условие задает верхнюю границу возможных углов наклона ВАХ источника питания дуги при уже выбранных остальных параметрах сварочной цепи. Третье условие ограничивает величину емкости C сверху. Условия устойчивости (17), в отличие от условий (2), связывают между собой не только параметры C, L, R, S_a но еще и параметры R_*, M и E , характеризующие электрические, теплофизические и геометрические свойства плавящегося электрода и напряженность электрического поля в столбе дуги.

Следует, однако, иметь в виду, что выполнение условий (17) обеспечивает лишь принципиальную возможность прихода системы в установившееся состояние после небольшого внешнего возмущения, но не гарантирует отсутствие негативного влияния емкости C на сам характер переходных процессов в сварочной цепи. Для получения наиболее полного представления о степени указанного влияния используем компьютерное моделирование процесса дуговой сварки. Основное внимание сосредоточим на режимах малых сварочных токов, в области которых, как известно [3–6, 8], характеристика дуги является падающей. Именно на этих режимах, согласно (17), следует ожидать существенного влияния емкости C на переходные процессы.

При моделировании будем использовать типовые значения параметров режима роботизированной дуговой сварки на малых токах [15]: $u_x = 30$ В, $i = 40$ А, $v_e = 25$ мм/с, $H = 15$ мм и реальные параметры сварочной цепи $R = 6 \cdot 10^{-2}$ Ом, $R_* = 1 \cdot 10^{-2}$ Ом, $L = 1 \cdot 10^{-3}$ Гн, $E = 2$ В/мм, $u_0 = 18$ В, $M = 0,5$ мм/(с·А). Что касается дифференциального сопротивления дуги S_a , то (из-за известных трудностей его непосредственного измерения) возьмем значение из графика вольт-амперной характеристики,



приведенного в работе [6]; оно в области малых токов ($i = 20 \dots 60$ А) примерно равно $S_a \approx -1,5 \cdot 10^{-2}$ В/А.

Задавая при моделировании диапазон возможных значений емкости C , будем исходить из следующих соображений. Любая электрическая цепь содержит так называемую «паразитную» емкость. Ее минимальное значение для сварочной цепи, согласно [6], примерно равно $C_m \approx 1 \cdot 10^{-8}$ ф. В то же время известно [1], что емкость C может быть специально введена в сварочную цепь. В таком случае желательно определить верхнюю границу значений этой емкости, выше которой переходный процесс становится неудовлетворительным с точки зрения технических требований, предъявляемых к дуговой сварке плавящимся электродом.

В качестве «возмущающего» воздействия, приводящего к возникновению переходного процесса (11) в сварочной цепи, используем, как показано на рис. 3, скачкообразное изменение расстояния $\Delta H = H_2 - H_1$ между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны. Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 4, 5. На рис. 4, а изображены три графика $l = l(t)$, представляющие собой реакцию длины дуги $l(t)$ на возмущение $\Delta H = -3$ мм при $S_a = -1,5 \cdot 10^{-2}$ В/А и при различных значениях емкости C . Кривая l является графиком нескольких переходных процессов, которые практически совпадают, хотя значения емкости, при которых были получены эти графики, принадлежат широкому интервалу $0 < C \leq 0,1$ ф. Отсюда можно сделать вывод, что пока емкость C не превышает некоторой величины (в нашем случае 0,1 ф), ее влияние на переходный процесс пренебрежимо мало. И только при дальнейшем увеличении этой емкости форма кривых переходного процесса заметно изменяется (см. кривые 2 и 3), приобретая колебательный характер, причем амплитуда колебаний увеличивается по мере увеличения емкости.

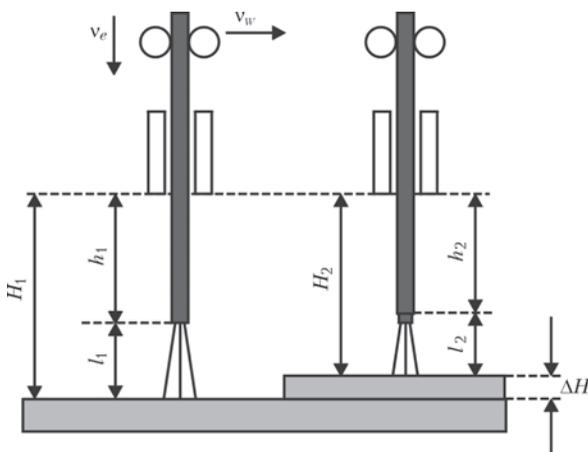


Рис. 3. Схема реализации скачкообразного возмущения ΔH (v_w — скорость движения электрода)

На рис. 4, б изображены графики $l = l(t)$, полученные при тех же значениях емкости C , что и графики на рис. 4, а. Но в отличие от них графики на рис. 4, б получены при условии $S_a > 0$. Сравнивая эти графики, приходим к выводу, что в случае, когда $S_a < 0$, влияние емкости C на переходные процессы в сварочной цепи на много большее, чем в случае, когда $S_a > 0$.

Следует обратить внимание на еще одно немаловажное обстоятельство. Для того, чтобы получить верное представление о переходных процессах, протекающих в сварочной цепи при $S_a < 0$, нужно наряду с другими ее параметрами учитывать и суммарное сопротивление R_* . Это сопротивление обычно не учитывают, считая его пренебрежимо малым. На самом же деле по порядку величины оно соизмери-

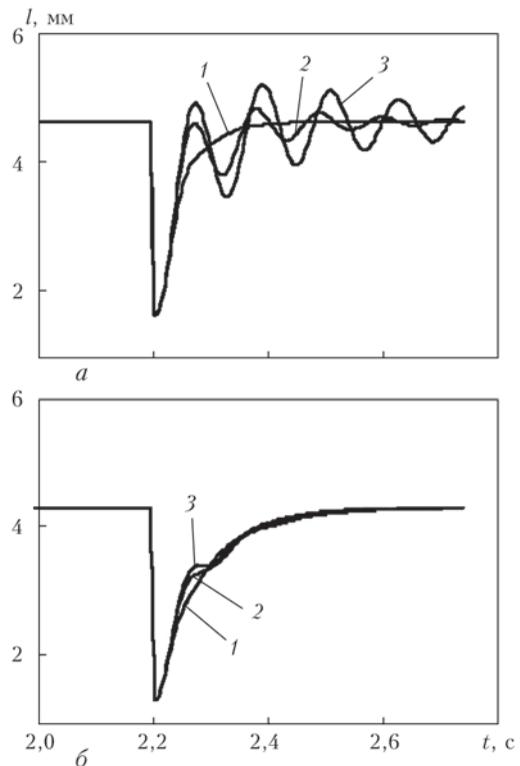


Рис. 4. Переходные процессы $l = l(t)$: а — при $S_a = -1,5 \cdot 10^{-2}$ В/А; б — при $S_a = 1,5 \cdot 10^{-2}$ В/А (l — $C \leq 0,1$ ф; 2 — $C = 0,3$ ф; 3 — $C = 0,4$ ф)

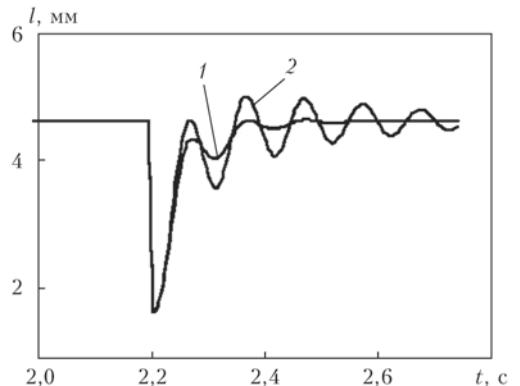


Рис. 5. Переходные процессы $l = l(t)$ при $C = 0,2$ ф и $S_a = -1,5 \cdot 10^{-2}$ В/А (l — $R_* = 1 \cdot 10^{-2}$ Ом; 2 — $R_* = 0$)



мо с абсолютным значением дифференциального сопротивления дуги S_a . Следовательно, его влияние на переходный процесс в сварочной цепи может оказаться весьма ощутимым.

Иллюстрацией к сказанному служат результаты, приведенные на рис. 5, на котором представлены графики $I = I(t)$, полученные при двух различных значениях сопротивления R_* . Кривая 1 на этом рисунке есть реакция длины дуги $l(t)$ на возмущение $\Delta H = -3$ мм, когда $R_* = 1 \cdot 10^{-2}$ Ом, а кривая 2 — когда $R_* = 0$. Из рисунка хорошо видно, что эти кривые значительно отличаются друг от друга. Отсюда непосредственно следует, что игнорируя сопротивление R_* , мы заведомо получаем неверную информацию о переходных процессах, протекающих в сварочной цепи.

На основании выше изложенного можно теперь сделать следующие выводы.

1. При больших и средних сварочных токах, когда рабочая точка располагается на возрастающем или неизменном участке вольт-амперной характеристики дуги, наличие емкости C в сварочной цепи не влияет на устойчивость режима дуговой сварки. Емкость C не влияет на устойчивость и в случае малых токов, когда рабочая точка располагается на падающем участке этой характеристики, но если при этом дифференциальное сопротивление дуги S_a по абсолютной величине меньше суммарного сопротивления подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке сварочной горелки, т. е. если $|S_a| < R_*$.

2. В том случае, когда $|S_a| > R_*$, наличие в сварочной цепи достаточно большой емкости C может привести к потере устойчивости режима дуговой сварки. Установленные критерии в виде алгебраических неравенств (17) позволяют оценивать верхнюю границу области значений этой емкости, внутри которой гарантируются устойчивые сварочные режимы.

3. Результаты компьютерного моделирования процессов, протекающих в сварочной цепи, показывают, что малая емкость C (порядка сотых долей фарады) не оказывает заметного влияния на переходные процессы при дуговой сварке как на малых, так и на больших токах. Дальнейшее увеличение этой емкости при сварке на малых токах приводит к возникновению заметных колебаний длины дуги, которые увеличиваются по мере приближения емкости к границе устойчивости, определяемой условиями (17). Приведенные результаты моделирования подтверждают еще одно немаловажное замечание о том, что для получения верного представления о переходных процессах, протекающих в сварочной цепи, необходимо

учитывать реальные сопротивления подводящих проводов, вылета электрода и скользящего контакта в мундштуке сварочной горелки.

В заключение заметим, что в последнее время особое внимание специалистов направлено на решение одной из трудных проблем, связанных с роботизацией дуговой сварки тонкостенных изделий и конструкций [16, 17]. Очевидно, что их сварка должна производиться на малых и очень малых сварочных токах. В этой связи результаты, изложенные в данной статье, будут полезными при разработке роботизированных сварочных технологий и соответствующего технологического оборудования.

1. *Верещаго Е.Н., Костюченко В.И.* Неустойчивость режима в цепи с емкостью и электрической дугой, питаемой от источника постоянного тока // Автомат. сварка. – 2014. – № 8. – С. 44–48.
2. *Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э.* Теория колебаний. – М.: Госиздат физико-математической литературы, 1959. – 915 с.
3. *Финкельбург В., Меккер Г.* Электрические дуги и термическая плазма. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961. – 370 с.
4. *Хренов К.К., Эсбиян Э.М.* Влияние статических характеристик дуги и источника питания на устойчивость горения и режима дуги // Свароч. производство. – 1962. – № 5. – С. 10–13.
5. *Патон Б.Е., Лебедев В.К.* Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. – М.: Машиностроение, 1966. – 359 с.
6. *Лесков Г.И.* Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
7. *Эсбиян Э.М.* Исследование электрических и технологических свойств малоамперной сварочной дуги // Сб. «Сварка специальных металлов и сплавов». – Киев: Изд-во АН УССР, 1963. – С. 137–152.
8. *Сисоян Г.А.* Электрическая дуга в электрической печи. – М.: Металлургия, 1974. – 304 с.
9. *Ионов Ю.Г.* К теории нестационарных процессов электрической дуги постоянного тока // Известия СО АН СССР. Сер. Технические науки. – 1986. – № 4. – Вып. 1. – С. 84–88.
10. *Ленивкин В.А., Дюргерев Н.Г., Сагиров Х.Н.* Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
11. *Rap J.* Arc welding and control theory. Proceedings of International Symposium of Japan Welding Society. – 1990. – Vol. 11 – P. 1033–1035.
12. *Судник В.А., Ерофеев В.А., Логвинов Р.В.* Исследование устойчивости процесса дуговой сварки в среде защитного газа // ТулГУ. – 1999. – С. 110–120.
13. *Цыбулькин Г.А.* О влиянии малых параметров на устойчивость процесса дуговой сварки плавящимся электродом // Автомат. сварка. – 2008. – № 6. – С. 29–32.
14. *Цыбулькин Г.А.* К оценке устойчивости одного класса динамических систем // Межд. науч.-техн. журнал «Проблемы управления и информатики». – 2014. – № 3. – С. 5–11.
15. *Цыбулькин Г.А.* Адаптивное управление в дуговой сварке. – Киев: Сталь, 2014. – 171 с.
16. *Грицына А.Н.* Проблемы формирования качественных сварных соединений тонкостенных конструкций при их выполнении неадаптивными роботами // 6-я Межд. науч.-практ. конф. «Инновационные технологии в машиностроении и металлургии»: Сб. статей (10 сент. 2014). – Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ, 2014. – С. 339–350.
17. *Людмирский Ю.Г.* Роботизация производства маложестких сварных конструкций. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ, 2002. – 140 с.

Поступила в редакцию 08.10.2015