

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СВАРОЧНОГО КОНТУРА ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН

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

В статье исследуется математическая модель динамических процессов, протекающих в сварочном контуре при роботизированной дуговой сварке плавящимся электродом в среде защитного газа. Сварочный контур рассматривается как самостабилизирующаяся система с обратной связью по скорости плавления электрода. В отличие от известных математических моделей в исследуемой модели учитывается зависимость скорости плавления электрода от текущих значений сварочного тока и напряжения на дуге. Основной целью статьи является изучение реакции сварочного контура на внешние возмущения, возникающие в процессе дуговой сварки. В рамках разработанной модели установлены критерии асимптотической устойчивости, которые в дополнение к уже известным критериям налагают определенные ограничения на параметры самого режима дуговой сварки, что важно с практической точки зрения. С помощью компьютерного моделирования проиллюстрировано хорошее соответствие этой модели реальным процессам, протекающим в сварочном контуре. Библиогр. 14, рис. 4.

Ключевые слова: роботизированная дуговая сварка, плавящийся электрод, сварочный контур, математическая модель, устойчивость сварочных процессов

Для построения эффективных алгоритмов адаптивного управления роботизированной дуговой сваркой плавящимся электродом необходимо располагать по возможности точной и в то же время достаточно простой математической моделью динамических процессов, протекающих в сварочном контуре. В качестве одной из таких моделей используется следующая система уравнений [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} (L_1 + L_2) \frac{di}{dt} + (R_1 + R_2)i &= u_x - u_a(i, l), \\ u_a(i, l) &= u_0 + El + S_a i, \\ l &= H - h, \\ h &= h_0 + \int_0^t (v_e - v_m) dt, \\ v_m &= Mi. \end{aligned} \right\} (1)$$

В этих уравнениях и на рис. 1 $i = i(t)$ — ток сварки; L_1, R_1, u_x, u_s — индуктивность, внутреннее сопротивление, напряжение холостого хода и напряжение на выходных клеммах источника сварочного тока (ИСТ), соответственно; L_2 — индуктивность контура, образованного подводящими проводами; R_2 — суммарное сопротивление вылета электрода, подводящих проводов, скользящего контакта в мундштуке горелки и части свариваемого изделия; $u_a = u_a(l, i)$ — напряжение на дуге; u_0 — сумма приэлектродных падений напряжения; $l = l(t)$ — длина дуги; $E = \partial u_a / \partial l$ — напряженность электрического поля в столбе дуги; $S_a = \partial u_a / \partial i$ — тангенс угла наклона статической

вольт-амперной характеристики дуги в окрестности рабочей точки сварки; $H = \text{const}$ — расстояние между торцом токоподводящего мундштука и свободной поверхностью сварочной ванны; $h_0, h = h(t)$ — начальное и текущее значения вылета электрода; $v_e = \text{const}, v_m = v_m(t)$ — скорости подачи и плавления электрода, соответственно; $M = \partial v_m / \partial i$ — крутизна токовой характеристики плавления электрода; t — текущее время.

Математическая модель (1) успешно используется при решении задач геометрической адаптации, т. е. адаптации сварочного автомата или робота к непредвиденным отклонениям сварочного инструмента от осевой линии свариваемого соединения непосредственно в процессе дуговой сварки [2–4]. Между тем, остается пока неясным, насколько эффективным будет применение этой модели при решении иного рода задач, в частности, задачи адаптивного управления самими режимами дуговой сварки. Дело в том, что в модели

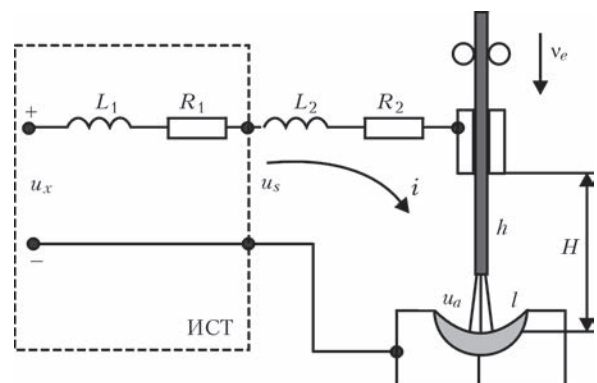


Рис. 1. Схема сварочного контура

(1) не учитывается зависимость скорости плавления электрода $v_m(t)$ от текущего значения напряжения на дуге $u_a(t)$. Основным доводом в пользу такого упрощения послужило то, что расстояние H между торцом горелки и свариваемым изделием при роботизированной дуговой сварке, в отличие от ручной сварки, поддерживается постоянным. Считалось, что и напряжение $u_a(t)$ при этом мало изменяется, а значит, и мало влияет на скорость плавления электрода. Поэтому расчетное среднее значение u_a фактически включалось в обобщенный параметр $M = \text{const}$, который и фигурирует в последнем уравнении системы (1). Заметим, что вместо равенства $v_m = Mi$ иногда (при больших сварочных токах) используют соотношение $v_m = Mi + Nhi^2$, где $N = \text{const}$ [3–6]. Но и в этом соотношении не учитывается текущее значение напряжения на дуге $u_a(t)$.

Скорость плавления электрода $v_m(t)$, как известно [7, 8], пропорциональна мощности электрической энергии, поступающей в дуговой промежуток, т. е. пропорциональна произведению $u_a(t)$ на $i(t)$. С другой стороны, в силу известного эффекта саморегулирования дуги, скорость $v_m(t)$ в установившемся режиме равна скорости подачи электрода v_e , т. е. $v_m(t) = v_e = \text{const}$. Следовательно, любые изменения $u_a(t)$ непременно будут приводить к соответствующим изменениям $i(t)$. Принимая это во внимание, уточним математическую модель (1), вводя вместо приближенного равенства $v_m = Mi$ более верное соотношение

$$v_m = Ku_a i. \quad (2)$$

Постоянный коэффициент K в этом соотношении включает электрические, теплофизические и геометрические характеристики плавящегося электрода. Его нетрудно рассчитать, если известны эти характеристики, или определить экспериментально. Кроме того, с помощью коэффициента K достаточно просто учесть ту часть электрической энергии, которая непосредственно расходуется на расплавление электрода.

Исключая переменные u_a , h , v_m из новой системы уравнений (т. е. из системы (1) с учетом равенства (2)), сведем ее к двум дифференциальным уравнениям относительно переменных i и l :

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= -R_w i - El + u_x - u_0, \\ \frac{dl}{dt} &= K(u_0 i + Eli + S_a i^2) - v_e, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где

$$L = L_1 + L_2, \quad R_w = R_1 + R_2 + S_a. \quad (4)$$

Нетрудно увидеть, что система уравнений (3) нелинейная. Важно проверить, при каких услови-

ях динамические процессы, описываемые этими уравнениями, будут иметь устойчивый характер.

Условия устойчивости сварочного процесса.

Найдем соотношения между параметрами сварочного контура и режима дуговой сварки, гарантирующие установившиеся (стационарные) режимы. Внесем с этой целью в уравнения (3) вместо переменных i и l постоянные величины i_∞ и l_∞ . В результате получим уравнения

$$\left. \begin{aligned} -R_w i_\infty - El_\infty + u_x - u_0 &= 0, \\ K(u_0 i_\infty + El_\infty i_\infty + S_a i_\infty^2) - v_e &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

из которых находим:

$$l_\infty = \frac{u_x - u_0}{E} - \frac{R_w}{E} i_\infty, \quad (6)$$

$$R_+ i_\infty^2 - u_x i_\infty + \frac{v_e}{K} = 0, \quad (7)$$

где

$$R_+ = R_w - S_a = R_1 + R_2. \quad (8)$$

Легко проверить, что при выполнении условия

$$v_e < \frac{Ku_x^2}{4R_+} \quad (9)$$

корни квадратного уравнения (7) вещественны и положительны. Следовательно, если справедливо неравенство (9) и обеспечено ограничение $0 < l(t) < l_k$, где l_k — критическое значение длины дуги, при котором происходит ее обрыв, то непременно существуют стационарные режимы дуговой сварки.

Заменим в дифференциальных уравнениях (3) переменные i и l суммами $i = i_\infty + \xi$ и $l = l_\infty + \lambda$, где ξ и λ — отклонения текущих значений сварочного тока i и длины дуги l от соответствующих установившихся значений $i_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} i(t)$ и $l_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} l(t)$. Ограничиваясь членами, содержащими переменные ξ и λ в первой степени, и учитывая равенства (5), получим систему дифференциальных уравнений первого приближения:

$$\left. \begin{aligned} L \frac{d\xi}{dt} &= -R_w \xi - E\lambda, \\ \frac{d\lambda}{dt} &= K[u_x - (R_w - 2S_a)i_\infty]\xi + KEi_\infty \lambda. \end{aligned} \right\}$$

Исключив из этой системы переменную λ , придем к одному дифференциальному уравнению относительно ξ :

$$\left. \begin{aligned} L \frac{d^2 \xi}{dt^2} + (R_w - KE Li_\infty) \frac{d\xi}{dt} + KE(u_x - 2R_+ i_\infty) \xi &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Задача об устойчивости режима дуговой сварки сводится, таким образом, к исследованию устойчивости нулевого (тривиального) решения $\xi = 0$.

Известно [9], что для устойчивости процесса, описываемого обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка, необходимо и достаточно, чтобы все его коэффициенты были положительны (критерий Стодолы). Значит, переменная $\xi = i - i_\infty$ в уравнении (10) при $t \rightarrow \infty$ будет стремиться к нулю, если верны следующие неравенства:

$$R_w > 0, R_w - KEI_\infty > 0, u_x - 2R_+i_\infty > 0. \quad (11)$$

Первое неравенство в (11) означает, что алгебраическая сумма $R_w = R_1 + R_2 + S_a$ должна быть положительной. Это известный критерий Кауфмана–Никитина [10–14]. Сопротивление R_1 , входящее в эту сумму, по существу является абсолютной величиной углового коэффициента вольт-амперной характеристики ИСТ. Следовательно, $R_1 = |-\partial u_s / \partial i| > 0$. Угловой коэффициент $S_a = \partial u_a / \partial i$, как известно [7, 8], может быть и положительным, и отрицательным. Если $S_a \geq 0$, то и $R_w > 0$. Если же $S_a < 0$, то для выполнения условия $R_w > 0$ необходимо, чтобы согласно (4) и (8) имело место неравенство

$$R_+ - |S_a| > 0. \quad (12)$$

Второе и третье условия в (11) налагают ограничения на индуктивность L и на соотношение между параметрами режима дуговой сварки u_x и i_∞ . Запишем эти условия в следующем виде:

$$L < \frac{R_w}{KEi_\infty}, \frac{u_x}{i_\infty} > 2R_+. \quad (13)$$

Итак, для того чтобы процесс, описываемый уравнением первого приближения (10), был асимптотически устойчив, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия (9), (12), (13). Если указанные условия выполняются и возмущающие воздействия достаточно малы, то, согласно известной теореме Ляпунова [9], процесс, описываемый исходными нелинейными уравнениями (3), также асимптотически устойчив.

Реакция сварочного контура на внешние воздействия. Сварочный контур, включающий электрическую дугу, плавящийся электрод, подаваемый в процессе сварки с определенной скоростью v_e , и источник сварочного тока ИСТ, с точки зрения теории автоматического управления представляет собой, как известно [2, 7], замкнутую систему с внутренней обратной отрицательной связью по скорости плавления электрода. Благодаря этой обратной связи система сама (без специальных устройств) осуществляет стабилизацию скорости плавления электрода v_m на уровне заданной скорости подачи электрода v_e .

О стабилизирующих свойствах сварочного контура, в том числе о быстроте и точности отработки входных воздействий, обычно судят по его

реакции на эти воздействия. Изучая реакцию математической модели (3) на аналогичные воздействия, можно оценить степень ее соответствия (адекватности) реальным процессам, протекающим в сварочном контуре, и, в частности, сравнить между собой модели (3) и (1).

Для такого рода верификации модели (3) проведем имитационный эксперимент на ЭВМ. Пусть требуется осуществлять дуговую сварку в среде защитного газа плавящимся электродом, диаметр которого равен 1 мм. Ток сварки $i_\infty \approx 150$ А, длина дуги $l_\infty \approx 4$ мм. Значения параметров сварочного контура: $L = 4 \cdot 10^{-4}$ Гн, $R_1 = 0,025$ Ом, $R_2 = 0,01$ Ом, $H = 17$ мм, $u_0 = 16$ В, $E = 2$ В/мм, $S_a = 0,005$ В/А, $K = 0,012$ мм/(А·В·с).

Напряжение u_x можно рассчитать, используя уравнение (6): $u_x = EI_\infty + u_0 + R_w i_\infty = 2 \cdot 4 + 16 + 0,04 \cdot 150 = 30$ В. Скорость подачи электрода v_e определим из уравнения (7): $v_e = Ki_\infty(u_x - R_+ i_\infty) = 0,012 \cdot 150 \cdot (30 - 0,035 \cdot 150) \approx 45$ мм/с.

Подставляя эти значения в выражения (8), (12) и (13)

$$v_e < \frac{0,012 \cdot 30^2}{4 \cdot 0,035} \approx 77 \text{ мм/с},$$

$$R_+ - |S_a| = 0,035 - 0,005 = 0,030 > 0,$$

$$L < \frac{0,04}{0,012 \cdot 2 \cdot 150} \approx 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гн},$$

$$\frac{30}{150} > 2 \cdot 0,035 \rightarrow 0,2 > 0,07,$$

убеждаемся, что условия устойчивости выбранного нами режима дуговой сварки выполняются с «запасом».

В качестве типовых возмущающих воздействий используем ступенчатые изменения (скачки) напряжения холостого хода Δu_x и скорости подачи электрода Δv_e :

$$u_x(t) = \begin{cases} u_x, & t < t_*, \\ u_x + \Delta u_x, & t \geq t_*, \end{cases}$$

$$v_e(t) = \begin{cases} v_e, & t < t_*, \\ v_e + \Delta v_e, & t \geq t_*. \end{cases}$$

Здесь t_* — момент возникновения соответствующих воздействий.

Результаты эксперимента представлены на рис. 2, 3. На этих рисунках сплошными линиями изображены процессы, описываемые уточненной математической моделью (3), а штриховыми — процессы, описываемые исходной моделью (1).

Графики, приведенные на рис. 2, отражают реакцию сварочного контура на скачок напряжения $\Delta u_x = 3$ В. На этом рисунке отчетливо видно, что в момент скачка (при $t_* = 3$ с) почти мгновенно увеличивается ток сварки $i(t)$ и скорость плавления элект-

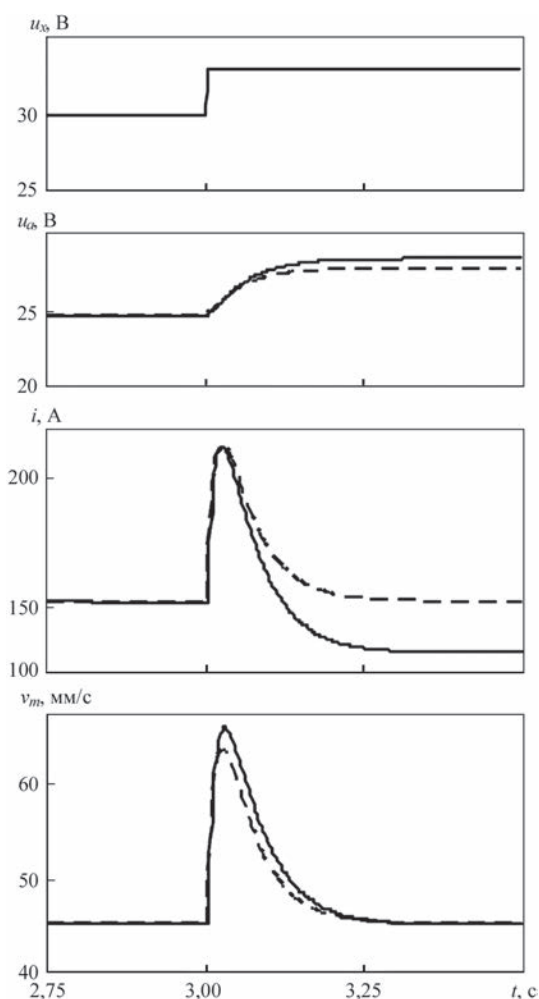


Рис. 2. Реакция сварочного контура на возмущение $\Delta u_x = 3$ В рода $v_m(t)$ (скорость увеличения $i(t)$ и $v_m(t)$ тем больше, чем меньше соотношение L/R_+). Напряжение же на дуге $u_a(t)$ увеличивается значительно медленнее и тем медленнее, чем больше электросварочная постоянная времени $T_w \approx R_w/[KE(u_x - 2R_+i_\infty)]$. Расчетное значение $T_w \approx 0,085$ с. Затем ток $i(t)$ и скорость $v_m(t)$ также медленно уменьшаются. После завершения переходного процесса (спустя время $\tau \approx 3T_w$) переменные $i(t)$ и $u_a(t)$ принимают новые значения, причем $u_a(t)$ становится больше, а $i(t)$ меньше по сравнению с их значениями до возмущения Δu_x . Скорость же плавления $v_m(t)$ устанавливается равной скорости подачи электрода v_e .

Графики, приведенные на рис. 3, отражают реакцию тех же переменных $u_a(t)$, $i(t)$ и $v_m(t)$ на скачок скорости подачи электрода $\Delta v_e = 5$ мм/с. Здесь картина совершенно иная. Прежде всего изменение всех переменных происходит медленно (со скоростью, определяемой параметром T_w). После же завершения переходных процессов устанавливаются новые значения всех переменных, включая и $v_m(t)$, соответствующие новой скорости подачи электрода $v_e + \Delta v_e$.

Существенное различие в быстроте реакции сварочного контура на возмущения Δu_x и Δv_e легко

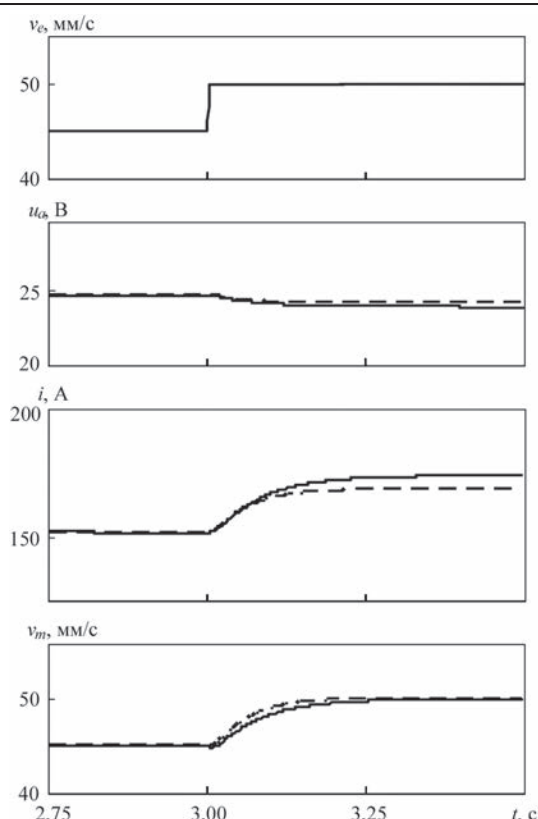


Рис. 3. Реакция сварочного контура на возмущение $\Delta v_e = 5$ мм/с понять, если проследить пути прохождения этих возмущений от точек их приложения до точек измерения переменных $i(t)$, $u_a(t)$, $v_m(t)$ (см. структурную схему на рис. 4). Здесь уместно заметить, что указанное различие часто упускается из виду, а между тем его учет при разработке тех или иных способов импульсно-дуговой сварки может оказаться определяющим.

Сопоставляя между собой переходные процессы, изображенные на рис. 2, 3 сплошными и штриховыми линиями, обнаруживаем, что реакции сварочного тока $i(t)$ на одно и то же возмущение Δu_x существен-

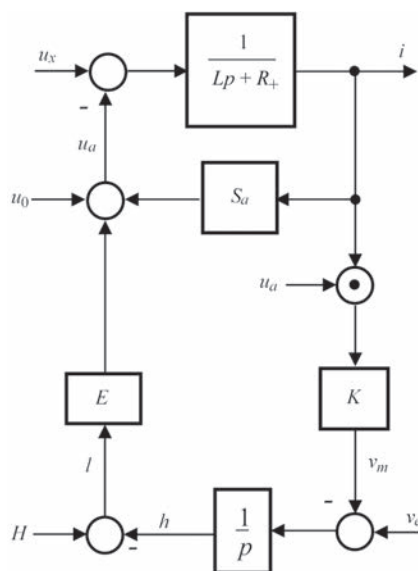


Рис. 4. Структурная схема сварочного контура

но разнятся. Как раз этот факт и свидетельствует о том, что в математической модели (3), в отличие от модели (1), учитывается зависимость скорости плавления электрода $v_m(t)$ не только от текущего значения сварочного тока $i(t)$, но и от текущего значения напряжения на дуге $u_a(t)$.

В заключение заметим, что результаты имитационного эксперимента вполне согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работах [7, 14] и демонстрируют довольно хорошее соответствие математической модели (3) реальным динамическим процессам, протекающим в сварочном контуре при дуговой сварке плавящимся электродом.

Выводы

1. Математическая модель (3), по сравнению с моделью (1), более точно отражает существенные стороны динамических процессов. Следовательно, она дает возможность извлечь и более точную информацию об этих процессах, необходимую как при углубленном изучении рассматриваемых процессов, так и при решении задач адаптивного управления этими процессами.

2. Критерии устойчивости (9), (12) и (13), установленные на основе математической модели (3), в дополнение к уже известным критериям, налагают определенные ограничения на параметры самого режима дуговой сварки, что особенно ценно в практическом отношении.

1. Pan J. Arc welding control / J. Pan. – Woodhead Publishing Ltd, 2003. – 601 p.
2. Цыбулькин Г. А. Адаптивное управление в дуговой сварке / Г. А. Цыбулькин. – К.: Сталь, 2014. – 171 с.
3. Sugitani Y. Making Best Use of the Arc Sensor / Y. Sugitani // Journal of the Japan welding society. – 2000. – Vol. 69, № 2. – P. 46–50.
4. Ushio M. Sensors in Arc Welding / M. Ushio // Transactions of JWRI. – 1991. – Vol. 20, № 2. – P. 157–163.
5. Судник В. А. Математическая модель источника теплоты при дуговой сварке плавящимся электродом в смеси защитных газов. Часть 1. Нормальный процесс / В. А. Судник, А. В. Иванов // Сварочное производство. – 1998. – № 9. – С. 3–9.
6. Коринец И. Ф. Математическая модель плавления электродной проволоки при дуговой сварке / И. Ф. Коринец // Автоматическая сварка. – 1995. – № 10. – С. 39–43.
7. Патон Б. Е. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки / Б. Е. Патон, В. К. Лебедев. – М.: Машиностроение, 1966. – 359 с.
8. Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М.: Машиностроение, 1970. – 330 с.
9. Барбашин Е. А. Введение в теорию устойчивости / Е. А. Барбашин. – М.: Наука, 1967. – 223 с.
10. Финкельбург В. Электрические дуги и термическая плазма / В. Финкельбург, Г. Меккер. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1961. – 370 с.
11. Никитин В. П. Электрические машины и трансформаторы для дуговой сварки / В. П. Никитин. – М.; Л.: Энергоиздат, 1934. – 260 с.
12. Цыбулькин Г. А. О влиянии малых параметров на устойчивость процесса дуговой сварки плавящимся электродом / Г. А. Цыбулькин // Автоматическая сварка. – 2008. – № 6. – С. 29–32.
13. Дюргеров Н. Г. Устойчивость системы саморегулирования дуги при механизированной и автоматической сварке / Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров // Сварочное производство. – 2009. – № 2. – С. 13–14.
14. Автоматизация сварочных процессов; под ред. В. К. Лебедева, В. П. Черныша. – К.: Вища школа, 1986. – 296 с.

Поступила в редакцию 06.09.2016

Напруження та деформації при зварюванні і паянні: підручник / Л. М. Лобанов, Г. В. Єрмолаєв, В. В. Квасницький, О. В. Махненко, Г. В. Єгоров, А. В. Лабарткава; під загальною редакцією акад. Л. М. Лобанова. – Миколаїв: НУК, 2016. – 248 с.

Розглянуто механізми та основні причини утворення напружень і деформацій при зварюванні і паянні, чинники, які впливають на їх величину. Наведено інженерні і комп'ютерні методи розрахунку загальних і місцевих деформацій та моделювання напружено-деформованого стану у вузлах і конструкціях різного типу, а також методи їх регулювання.

Призначено для студентів технічних університетів, що вивчають зварювання і споріднені процеси. Може бути корисним дипломникам, магістрантам, аспірантам, інженерам та фахівцям, які займаються проектуванням і виготовленням зварних конструкцій.

