

УДК 621.314.572:621.791.037

DOI 10.46960/2658-6754_2023_4_43

УПРАВЛЕНИЕ СВАРОЧНЫМ ИНВЕРТОРОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСВАРКИ ТРУБ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

В.С. Савчук

ORCID: 0000-0002-2281-6612 e-mail: vladsava1997@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.С. Плехов

e-mail: aplehov@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Целью работы является разработка системы управления электродуговой сварочной установкой на основе анализа тепловых процессов и разработанных авторами алгоритмов управления режимами работы электрической силовой схемы источника питания. Используются математические и имитационные модели сварочных процессов с функциями управления импульсными режимами сварки. Рассмотрены электротермические факторы, влияющие на процесс формирования сварного шва. Предложен способ управления импульсами тока сварочной дуги.

Ключевые слова: зона термического влияния, источник питания, сварочный процесс, теплоперенос, электрическая дуга.

Для цитирования: Савчук В.С., Плехов А.С. Управление сварочным инвертором для электросварки труб высокого давления // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 4. С. 43-54. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_43

WELDING INVERTER CONTROL FOR ELECTRIC WELDING OF HIGH-PRESSURE PIPES

V.S. Savchuk

ORCID: 0000-0002-2281-6612 e-mail: vladsava1997@mail.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.S. Plekhov

e-mail: aplehov@mail.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper presents a development of control system for an electric arc welding installation based on the analysis of thermal processes and algorithms developed by the authors for controlling the operating modes of the power supply. Mathematical and simulation models of welding processes with control functions of pulsed welding modes are used. The electrothermal factors influencing the process of forming a weld are considered. A method for controlling the current pulses of the welding arc is proposed.

Keywords: electric arc, heat and mass transfer, power supply, zone of thermal influence, welding process.

For citation: V.S. Savchuk and A.S. Plekhov, “Welding inverter control for electric welding of high-pressure pipes”, *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 43-54, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_4_43

I. Введение

Сварочное производство получило широкое распространение во многих отраслях промышленности, таких как машиностроение и станкостроение, а также в области строительства и изготовления технологического оборудования для энергетики, металлургии и химии.

Полуавтоматическая сварка *MIG*, *MAG*, *TIG* (сокращенно от *MIG* – *Metal Inert Gas*, дуговая сварка в защитной среде инертного газа; *MAG* – *Metal Active Gas*, дуговая сварка в защитной среде активного газа; *TIG* – *Tungsten Inert Gas*, сварка в среде инертного газа неплавящимся электродом), является основной технологией при производстве трубопроводов, эстакад и других опасных производственных объектов, тесно связанных со строительной отраслью нашей страны.

На рис. 1 представлены элементы оборудования для осуществления полуавтоматической дуговой сварки.

Исследователями отмечается много проблем в сварочной области, в том числе, разбрызгивание электродного материала в количестве, зависящем от видов и режимов самого процесса в зоне термического воздействия дуги. Еще одной проблемой является высокая инерционность электрических и температурных параметров дуги и элементов сварного шва [1, 2], которые оказывают прямое влияние на итоговое качество сварного изделия.

Качество сварного шва зависит от степени проплавления металла. Авторы предлагают концепцию управления тепломассопереносом расплавленных капель металла посредством изменения сварочного тока в функции электрического сопротивления между электродами, измеренного косвенным способом. Концепция построена на основе математической модели нагрева капли металла, переносимого с плавящегося электрода на сварной шов. Имитационные модели формируют температурные графики в зависи-

мости от толщины свариваемого металла. Результаты, полученные при имитационных экспериментах, проверяются на программируемой лабораторной установке «Лаборатор».

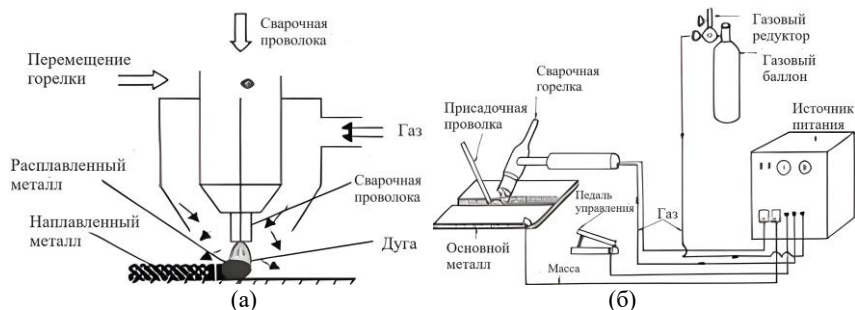


Рис. 1. Устройство горелки (а) и оборудование для реализации полуавтоматического сварочного процесса (б)

Fig. 1. Burner design (a) and equipment for implementing the semi-automatic welding process (b)

II. Определение графика нагрева электродной капли

Силы [1], влияющие на формирование электродной капли при ее переносе в сварочную ванну шва, показаны на рис. 2, где F – электродинамическая сила, Н; P – сила тяжести, Н; G – сила внутреннего давления, Па; N – сила поверхностного натяжения. Здесь проявляется пинч-эффект – возникновение вокруг электрического проводника центростремительных сжимающих сил, пропорциональных квадрату тока в проводнике, он определяется эффектом Беннета [3]. Этот эффект присутствует в любой момент времени, когда ток не равен нулю. Но особое влияние на перенос металла в ванну этот эффект имеет именно на этапе формирования капли. После окончания начального периода короткого замыкания, когда резко увеличивается сварочный ток, начинается рост электромагнитных сил, которые сжимают перемычку, в результате чего образуется «мостик» между каплей и электродом. Значение тока зависит от типа и диаметра используемой сварочной проволоки. Далее сварочный ток повышается плавно, а не скачком, источник питания «готовится» к моменту отделения капли от электрода.

В процессе электродуговой сварки плавящимся электродом всегда имеет место переход электродного металла на изделие в виде капель, величина которых зависит от тока сварки. Поэтому при полуавтоматической сварке сопротивление дугового промежутка R_d зависит от фазы перехода капли в сварочную ванну и циклически изменяется во времени с частотой 20-200 Гц (рис. 3).

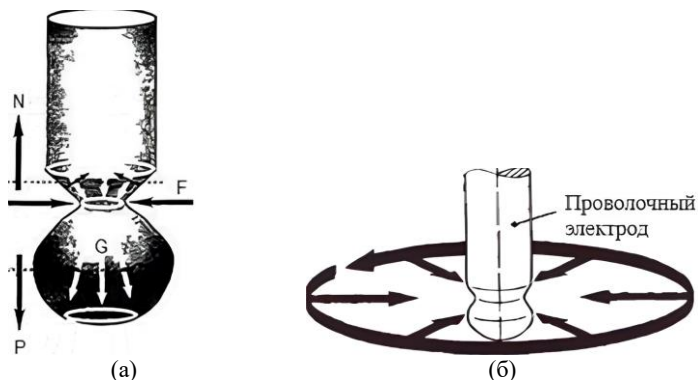


Рис. 2. Силы, влияющие на формирование электродной капли (а), и центростремительная сила (б)

Fig. 2. Forces influencing the formation of an electrode drop (a) and centripetal force (b)

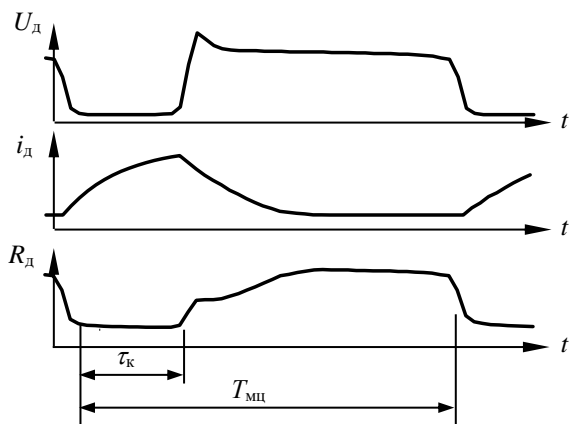


Рис. 3. Временные диаграммы:
 U_d – напряжение дуги, В; I_d – ток дуги, А; $T_{\text{мц}}$ – время полного цикла, с;
 τ_k – время короткого замыкания, с;
 R_d – сопротивление дугового промежутка, Ом

Fig. 3. Timing diagrams:
 U_d – arc voltage, В; I_d – arc current, А; $T_{\text{мц}}$ – full cycle time, s;
 τ_k – short circuit time, s; R_d – arc gap resistance, Ohm

Процесс сварки, который имеет наибольшие шансы на развитие, называется *STT*-процессом (сокращение от английского термина *Surface*

Tension Transfer – перенос за счет сил поверхностного натяжения), разработанный компанией «Lincoln Electric» (США) [4].

Сущность этого процесса заключается в том, что перенос массы расплавленного металла осуществляется путем не самопроизвольно сформированных импульсов, а путем принудительного создания коротких замыканий [5]. Формы кривых сварочного тока и напряжения при сварке методом *STT* изображены на рис. 4.

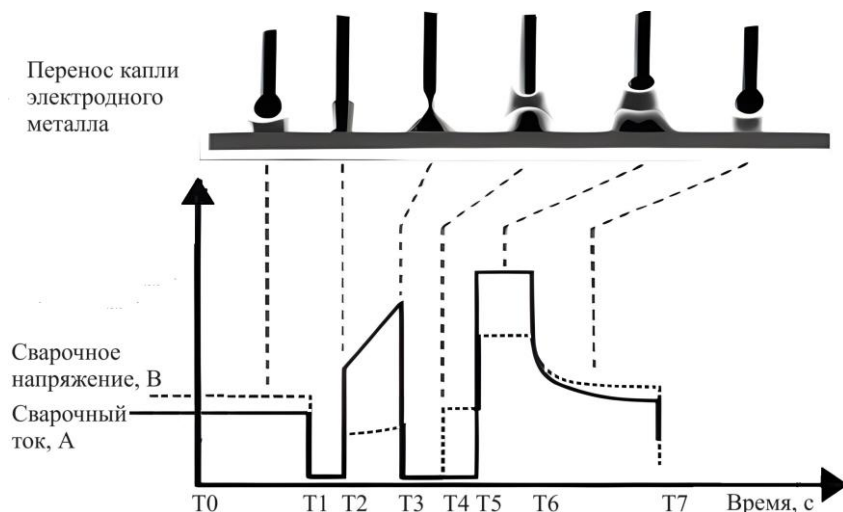


Рис. 4. Формы кривых сварочного тока и напряжения при сварке методом *STT*

Fig. 4. Shapes of welding current and voltage curves during *STT* welding

Капля металла переходит в ванну расплава в результате действия сил поверхностного натяжения. После касания каплей расплавленного металла сварочный ток резко уменьшается, и она начинает плавно «затягиваться» в ванну силами поверхностного натяжения, в результате этого разбрызгивание металла практически отсутствует. Ток дуги значительно зависит от фазы, в которой формируется капля на протяжении всего цикла переноса металла в сварочную ванну. Определение фазы переноса происходит за счет управления величины напряжения дуги.

Цикл, происходящий на рис. 4 можно разделить на следующие промежутки времени T_i и этапы i :

– подготовка капли в периоде времени $T7-T0-T1$;

- начальный период короткого замыкания на $T1-T2$;
- период возникновения сил на $T2-T3$;
- рост капли на $T5-T6$;
- переход на базовый ток на $T6-T7$.

Происходящие процессы с введением новых переменных математически описываются системой дифференциальных уравнений (2)-(7) и функциями (1). Уравнение (5) учитывает поддув защитного газа.

$$m_{\text{ану}} = (m_{\text{ан}}^*, t) \rightarrow \text{sym}U(t), I(t); \quad (1)$$

$$mc\theta = Q = Pt; \quad (2)$$

$$d / dt; mc\theta = Pt; \quad (3)$$

$$mc \frac{d\theta}{dt} = P \frac{dt}{dt}; \quad (4)$$

$$mc \frac{d\theta}{dt} = P - \gamma\theta; \quad (5)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{mc} P - \frac{\gamma}{mc} \theta; \quad (6)$$

$$P = P_{\text{д}} = U_{\text{д}} \cdot I_{\text{д}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_{\text{плав}}} (U_{\text{д}}^2) dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_{\text{плав}}} (I_{\text{д}}^2) dt} = U_{g_{\text{rms}}} \cdot I_{g_{\text{rms}}}, \quad (7)$$

где m – масса капли, кг; θ – температура электродного металла, °С; Q – необходимое тепло для сварочного процесса, Дж; P – мощность источника, Вт; t – время сварочного цикла, с; γ – коэффициент теплоотдачи; $T_{\text{плав}}$ – время плавления материала, с; $U_{g_{\text{rms}}}$ – напряжение дуги с учетом ее переменного состояния, В; $I_{g_{\text{rms}}}$ – ток дуги с учетом ее переменного состояния, А.

Вышеописанные уравнения упрощенно можно представить в виде:

$$\frac{U^2}{R} = P = UI = U \frac{U}{R} = RI = RI^2. \quad (8)$$

Имитационная модель, построенная в программной среде *MatLab Simulink*, при рассматриваемых выше тепловых процессах представлена на рис. 5. Блок *Constant* – заданная мощность, *Product1* и *Product2* – умножитель, необходимый для обрыва температурного нагрева после расплава, *Scope* – элемент, позволяющий снять осциллограмму, *Constant2* и *Constant1* элементы, задающие температуру расплава и ограничение нагрева в после-

дующем процессе, *Display* – отражает текущие значения состояния происходящего процесса, *Relay1* и *Relay2* элементы релейной электрической схемы управления электрической мощностью дуги.

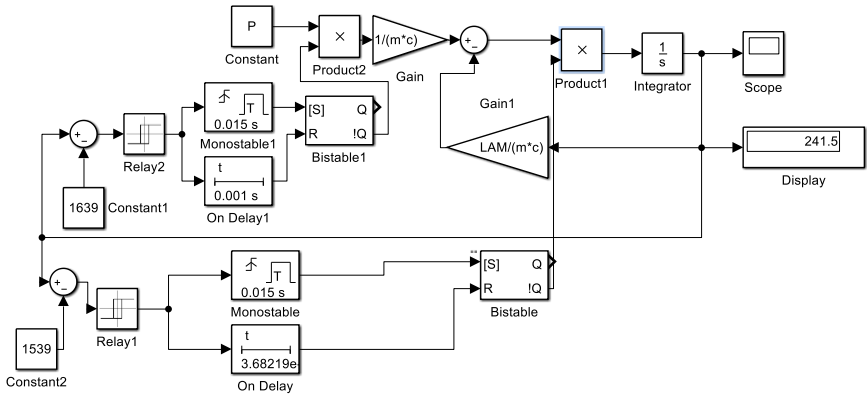


Рис. 5. Модель теплового процесса сварки

Fig. 5. Model of the thermal welding process

Наиболее точно сварочный процесс раскрывает (9):

$$Q = P_{\text{им}} \cdot T_{\text{им}} = m_{\text{кз}} c_{\text{кз}} \theta_{\text{кз}} + (m_{\text{зо}} + m_{\text{кз}}) \gamma + m_{\text{эд}} c_{\text{эд}} \theta_{\text{зо}} + \gamma_{\text{э}} (\theta_{\text{кз}} [\theta_{\text{с}}] + \gamma_{\text{д}} (\theta_{\text{зо}} - \theta_{\text{ср}})), \quad (9)$$

где Q – необходимое тепло для расплава капли, Дж; $P_{\text{им}}$ – мощность импульса, Вт; $T_{\text{им}}$ – время импульса, с; $m_{\text{кз}}$ – масса капли, кг; $c_{\text{кз}}$ – удельная теплоемкость металла; $\theta_{\text{кз}}$ – температура плавления электродного металла, С; $m_{\text{зо}}$ – масса активного пятна, кг; γ – удельная теплота плавления капли и активного пятна; $m_{\text{эд}}$ – масса дуги, кг; $c_{\text{эд}}$ – удельная теплоемкость дуги; $\theta_{\text{зо}}$ – температура плавления активного пятна, С; $\gamma_{\text{э}}$ – условная температура электрической дуги, С; $\theta_{\text{с}}$ – среднее значение воздействия теплоты дуги, Дж; $\gamma_{\text{д}}$ – удельная теплота активного пятна, Дж; $\theta_{\text{ср}}$ – теплота рассеяния в окружающую среду, Дж.

Уравнение (9) позволяет осуществить расчет теплового баланса типового сварочного процесса, но с учетом указанных параметров процесса нагрева [6, 7].

График нагрева электродной капли металла, полученный с помощью модели на рис. 5, показан на рис. 6. Капля формируется непосредственно после пика на приведенном графике.

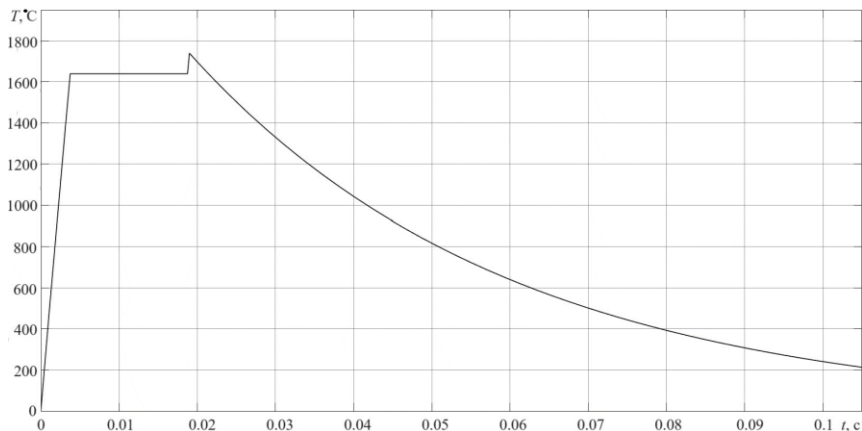


Рис. 6. График нагрева электродной капли

Fig. 6. Electrode drop heating shedule

III. Управление сварочным током

Эффективным способом решения проблемы является изменение мощности импульсов тока и их частоты при изменении теплоты рассеяния в окружающую среду, зависящей, в свою очередь, от размеров свариваемого объекта [8].

Применяя стабилизатор напряжения на электродах $U_{э}$, можно своевременно корректировать процесс горения дуги [9]. Принимая за основу способ управления сваркой, при котором величину тока предварительного подогрева задают обратно пропорционально сопротивлению между электродами, косвенно измеренному в период действия предварительного импульса тока. Ток подогрева выключают, когда приращение сопротивления по абсолютной величине станет меньше заданного значения. Величину сварочного тока задают прямо пропорционально сопротивлению, измеренному в конце импульса тока подогрева, а его длительность – пропорционально квадрату величины этого сопротивления. В этом случае применяем способ с плавным нарастанием тока сварки, при котором измеряют сопротивление между электродами и по величине измеренного сопротивления управляют сварочным током. В процессе нарастания сварочного тока определяют экстремальную точку максимальной величины сопротивления, фиксируют ее, после чего продолжают сварку без изменения величины сварочного тока [10, 11].

Разработанная принципиальная схема управления сварочным инвертором приведена на рис. 7.

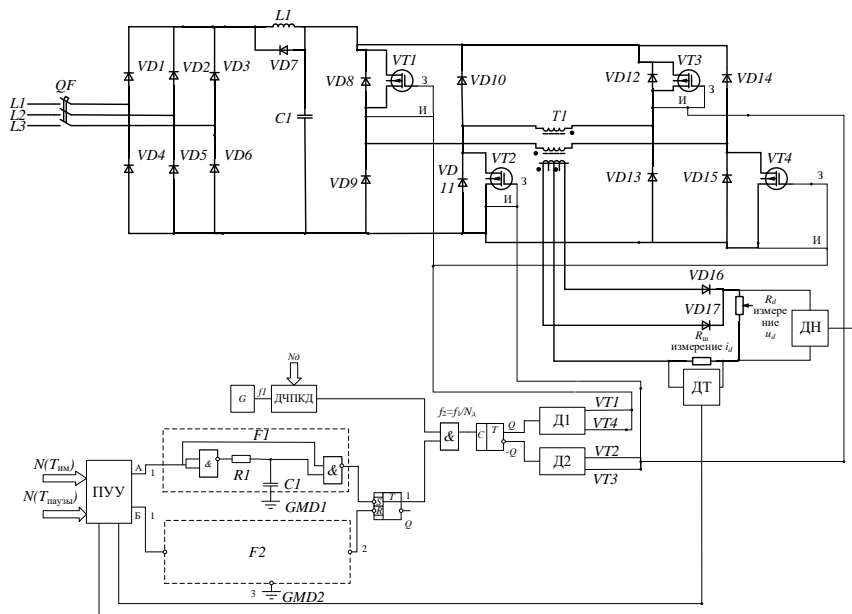


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема сварочного инвертора

Fig. 7. Schematic diagram of the welding inverter

Принципиальная схема состоит из следующих компонентов:

- входной выпрямитель по схеме Ларионова;
- L - C фильтр;
- звено двойного несимметричного мостового инвертора;
- высокочастотный трансформатор;
- выпрямитель на выходе;
- сглаживающий фильтр;
- управляющий блок инвертора, который включает в себя программируемое устройство управления (ПУУ) с обратной связью по датчику напряжения (ДН) и датчику тока (ДТ); ДЧПКД – делитель частоты переменного коэффициента деления; Д1 и Д2 – драйвера для VT1, VT4 и VT2, VT3 соответственно; F1 и F2 – формователи.

Разработанная схема позволяет исключить «мертвое» время между импульсами тока в условиях непрерывного контроля параметров электрической дуги при импульсных режимах работы сварочного аппарата.

Результаты, полученные при имитационных экспериментах, проведены на программируемой лабораторной установке «Лаборатор».

На снимке (рис. 8) показан результат применения разработанной методики с использованием графика нагрева электродной капли и четко выверенными импульсами мощности.

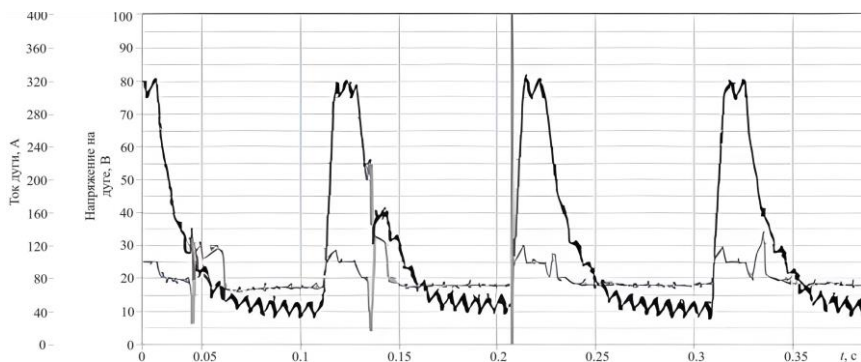


Рис. 8. Результат применения графика нагрева

Fig. 8. Result of applying the heating schedule

IV. Выводы

В работе рассмотрены зависимости влияния инертных параметров сварочного процесса на формирование сварочного шва, выведены математические и разработаны имитационные модели, позволяющие получить временные графики нагрева электродной капли. Показано, что предложенный способ управления инвертором позволяет добиться высокой степени проплавления шва. Разработанные схемы позволяют обеспечить процессы совмещения частотной модуляции тока дуги и переноса капли электродного металла, что позволяет увеличить производительность сварки. Показана возможность управления процессом сварки путем кратковременного шунтирования сварочной дуги, что позволяет формировать технологические характеристики процесса сварки.

© Савчук В.С., 2023

© Плехов А.С., 2023

Поступила в редакцию 24.05.2023

Принята к публикации 24.11.2023

Received 24.05.2023

Accepted 24.11.2023

Библиографический список

- [1] Завьялов В.Е., Иванова И.В., Кобецкой Н.Г. Технология сварки плавлением. С.-Пб.: Политехнический университет, 2018. – 484 с.
- [2] Мартынов Н.О. Электропитание установок дуговой сварки в системах электрообеспечения // IN SITU. 2015. № 4. С. 42-44.
- [3] Решанов В.А. Практика разработки технологии сварки плавлением при изготовлении, монтаже, ремонте и реконструкции крупногабаритных стальных конструкций. С.-Пб.: Любавич, 2018. – 204 с.
- [4] Лебедев В.А. Механизованная и автоматическая синергетическая сварка с импульсной подачей электродной проволоки // Сварочное производство. 2014. № 2. С. 13-19.
- [5] Юхин Н.А. Механизованная дуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG). М.: Союзло, 2008. – 72 с.
- [6] Карасев М.В., Вышемирский Е.М., Беспалов В.И., Работинский Д.Н., Захаров И.М., Беляев А.Е., Павленко Г.В., Соляник В.В. Особенности современных установок для механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах // Автоматическая сварка. 2004. № 12 (620). С. 38-41.
- [7] Кошелев П.А., Парамонов С.В. Электросварочные процессы и оборудование. С.-Пб.: ЛЭТИ, 2011. – 67 с.
- [8] Липпольд Д.С., Котеки Д.Д. Металлургия сварки и свариваемость нержавеющей сталей. С.-Пб.: Политехнический университет, 2011. – 467 с.
- [9] Козлов И.К., Сироткин Д.Г. Исследования и разработки в области анодной сварки // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 5(107). С. 426-431.
- [10] Володин В. Продвинутые источники сварочного тока // Силовая Электроника. 2014. № 4 (49). С. 82-90.
- [11] Савчук В.С. Автоматизированная система управления электродуговой сварочной установкой: вып. квалиф. работа магистра, НГТУ, Н. Новгород, 2021.

References

- [1] V.E. Zavyalov, I.V. Ivanova and N.G. Kobetskoy, *Tekhnologiya svarki plavleniem [Melting welding technology: textbook. Manual]*. St. Petersburg: Polytechnic University, 2018 (in Russian).
- [2] N.O. Martynov, “Elektropitanie ustanovok dugovoj svarki v sistemah elektroobezpecheniya [Power supply of arc welding installations in power supply systems]”, *IN SITU*, no. 4, pp. 42-44, 2015 (in Russian).
- [3] V.A. Rishanov, *Praktika razrabotki tekhnologii svarki plavleniem pri izgotovlenii, montazhe, remonte i rekonstrukcii krupnogabaritnyh stal'nyh konstrukcij [Practice of developing fusion-welding technology in the manufacture, installation, repair and reconstruction of large-sized steel structures]*. St. Petersburg: Lyubavich, 2018 (in Russian).
- [4] V.A. Lebedev, “Mechanized and automatic synergic welding with pulsed electrode wire feed”, *Welding International*, vol. 29, no. 2, pp. 140-144, March 2014. DOI: 10.1080/09507116.2014.897806

- [5] N.A. Yuhin, *Mekhanizirovannaya dugovaya svarka plavyashchimsya elektrodom v zashchitnyh gazah (MIG/MAG) [Mechanized arc welding with a melting electrode in protective gases (MIG/MAG)]*. Moscow: Souelo, 2008 (in Russian).
- [6] M.V. Karasev, E.M. Vyshemirsky, V.I. Bespalov, D.N. Rabotinsky, I.M. Zakharov, A.E. Belyaev, G.V. Pavlenko and V.V. Solyanik, "Peculiarities of modern machines for consumable electrode shielded-gas mechanized welding", *Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding)*, no. 12 (620), pp. 38-41, Dec. 2004.
- [7] P.A. Koshelev and S.V. Paramonov, *Elektrosvarochnyye processy i oborudovanie [Electric welding processes and equipment]*. St. Petersburg: LETI, 2011 (in Russian).
- [8] J.C. Lippold and D.J. Kotecki, *Metallurgiya svarki i svarivaemost' nerzhavayushchih stalej [Metallurgy of welding and weldability of stainless steel]*. St. Petersburg: Polytechnic University, 2011 (in Russian).
- [9] I.K. Kozlov and D.G. Syrotkin, "Studies and developments in the field of anodic welding", *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, no. 5(107), pp. 426-431, 2014.
- [10] V. Volodin, "Prodvinutyie istochniki svarochnogo toka [Advanced sources of welding current]", *Power Electronics*, vol. 4, no. 49, pp. 82-90, 2014 (in Russian).
- [11] V.S. Savchuk, "Avtomatizirovannaya sistema upravleniya elektrodugovoj svarochnoj ustanovkoj [Automated control system of electric arc welding machine]", Master thesis, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia, 2021 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Савчук Владислав Сергеевич, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Vladislav S. Savchuk, graduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Плехов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Alexander S. Plekhov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.