

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СВАРОЧНЫХ РАБОТ

Болотов С.В., к.т.н.

e-mail: s.v.bolotov@mail.ru

Захарченков К.В., к.т.н.

Макаров Е.В.

Фурманов В.А.

Белорусско-Российский университет

1. ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуальные системы управления процессами сварки начинают выходить за рамки исследовательских организаций и широко применяться в промышленности, что способствует переходу к Индустрии 4,0, внедрению в сварочном производстве киберфизических систем [1].

Системы контроля сварочных работ наиболее востребованы на объектах трубопроводного транспорта [2]. Производители сварочного техники с мировым именем поставляют в комплекте с поставляемым оборудованием автоматизированные системы контроля сварочных работ: ESAB WeldQAS [3], Kemppi Weld Eye [4], Fronius Weld Cube [5], Ewm Xnet [6], Lorch Q-Data [7], отдельные отечественные производители выпускают регистраторы сварочных процессов, например, НПФ «ИТС» [8], которые позволяют собирать данные о параметрах режима сварки и передавать их на сервер.

Актуальной задачей является разработка интеллектуальных алгоритмов обработки полученных с регистраторов данных [9-11].

2. ОПИСАНИЕ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ

Интеллектуальная система контроля сварочных работ (рис.1) включает аппаратную и программную часть.

Аппаратная часть системы содержит регистратор сварочных процессов РСП-БРУ 20-01, блок датчиков и пульт сварщика. Регистратор осуществляет идентификацию сварочного оборудования, сварщиков и руководителей сварочных работ, определение GPS координаты, считывание с сервера задания на сварку, запись и передачу

на сервер параметров режима сварки. Компенсационные датчики фирмы LEM, работа которых основана на эффекте Холла, обеспечивают измерение мгновенных значений сварочного тока и напряжения на дуге с частотой 10 кГц. До передачи в программный модуль обработки данных полученные с датчиков значения усредняются по 1000 точек. Значения температуры и влажности окружающего воздуха, температуры предварительного подогрева и межслойной температуры поступают в регистратор с пульта сварщика. При выходе параметров режима сварки за пределы допустимых значений, установленных инструкцией на технологический процесс сварки, на пульт сварщика поступают соответствующие сигналы, каждый из которых соответствует определенному звуку, генерируемому пультом.

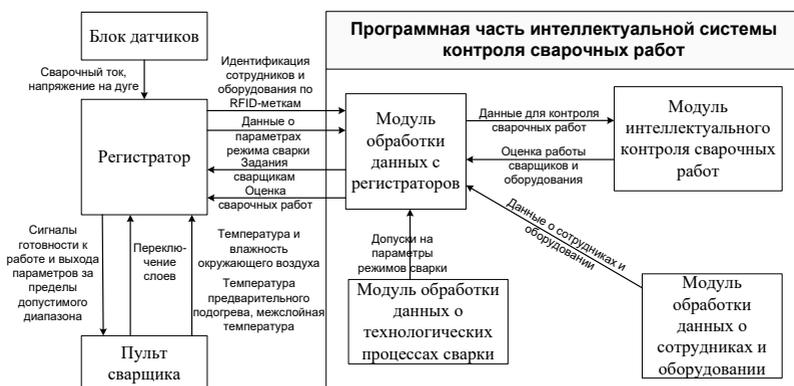


Рис.1. Структура интеллектуальной системы контроля сварочных работ

Алгоритм работы аппаратной части системы (рис.2) включает три основных блока:

- 1) **Блок идентификации.** В данном блоке на основе RFID-меток выполняется идентификация руководителей сварочных работ, сварщиков и сварочного оборудования. Определение местонахождения сварочного оборудования осуществляется на основе GPS-координаты.
- 2) **Блок подготовки регистратора к работе.** В данном блоке формируется перечень заданий сварщику с указанием допустимых значений параметров сварочного процесса, выполняется считывание температуры и влажности воздуха, температуры предварительного подогрева и межслойной температуры с пульта сварщика.

3) Блок регистрации параметров процесса сварки. Регистрация параметров процесса сварки осуществляется с частотой 10 кГц. При выходе параметров за пределы допустимых значений на пульте сварщика генерируется звуковой сигнал, отличающийся в зависимости от параметра, вышедшего за пределы допустимых значений. До передачи в программную часть системы значения параметров сварочного процесса усредняются по 1000 точек.

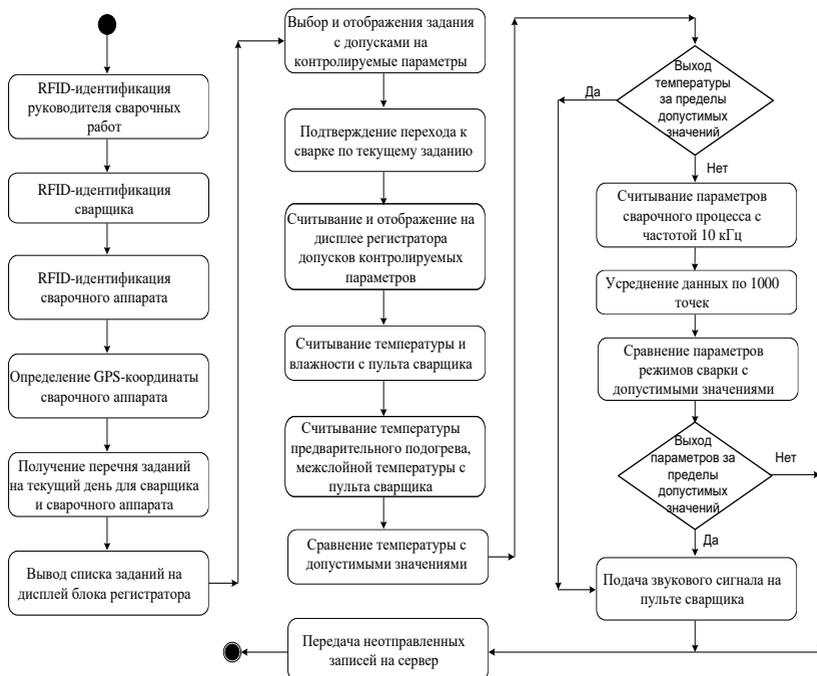


Рис.2. Алгоритм работы аппаратной части регистратора

Программная часть интеллектуальной системы контроля сварочных работ включает следующие основные модули (рис. 1):

1) Модуль обработки данных с регистраторов. В данный модуль поступает информация с регистраторов и с трех других модулей программной части системы. Модуль предназначен для организации обмена предварительно обрабатываемыми данными между аппаратной и программной частью системы. Для контроля сварочных работ на основе параметров режимов сварки осуществляется предварительная обработка данных с регистраторов с последующей передачей полученных значений в модуль

интеллектуального контроля сварочных работ. На основании информации о сварочных процессах, сварщиках и оборудовании из технологических инструкций ежедневно формируются задания на выполнение сварки на конкретных объектах. В данном модуле осуществляется формирование основных документов и отчетов по результатам выполнения сварочных работ (паспорта сварного шва, отчетов о работе сварщиков и сварочного оборудования).

- 2) Модуль обработки данных о сотрудниках обеспечивает ввод, изменение, удаление и поиск данных о руководителях сварочных работ или мастерах, бригадах и сварщиках. Результаты обработки информации в данном модуле предназначены для оценки соответствия квалификации сварщика технологическим процессам сварки. С учетом результатов обработки данных о сотрудниках осуществляется формирование заданий на выполнение сварочных работ.
- 3) Модуль обработки данных о технологических процессах сварки обеспечивает ввод, изменение, удаление и поиск данных о технологических инструкциях. Результаты обработки информации в данном модуле учитываются при формировании заданий на выполнение сварочных работ.
- 4) Модуль интеллектуального контроля сварочных работ предназначен для оценки работы сварщиков и сварочного оборудования. В данном модуле реализована методика интеллектуального контроля сварочных работ на основе результатов обработки данных о режимах сварки. По результатам работы модуля результаты оценки качества сварочного процесса каждый 0,5 с передаются на пульт сварщика.

При реализации программной системы использованы React как основная библиотека пользовательского интерфейса; ASP. Net Core – для реализации бизнес-логики системы; PostgreSQL для создания базы данных; EntityFramework для эффективного взаимодействие объектов базы данных с серверной частью приложения; LabView для сбора и обработки данных с регистратора сварочных процессов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АППРОБАЦИИ СИСТЕМЫ

Интеллектуальная система контроля сварочных работ может применяться при ручной дуговой (ММА) и полуавтоматической (MIG/MAG) сварке [12]. На рис.3 представлены зафиксированные регистратором сварочных процессов осциллограммы тока и напряжения с частотой оцифровки 10 кГц. Сварка (наплавка) производилась на пластины 100x200x10 мм из стали Ст.3 проволокой

Св08Г2С диаметром 1,2 мм в среде защитного газа CO_2 при сварочном токе 200 А, напряжении 21,3 В, скорости сварки 28,8 м/ч.

Анализ представленных осциллограмм показывает, что перенос электродного металла в сварочную ванну осуществляется короткими замыканиями дугового промежутка [13-15].

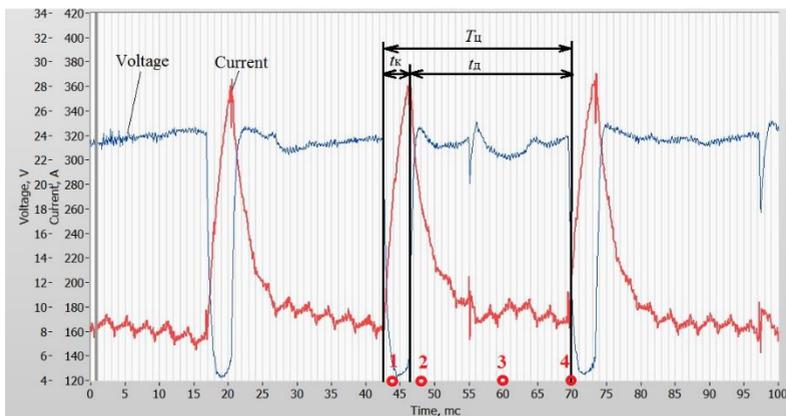


Рис.3. Осциллограммы процесса сварки

В ходе экспериментальных исследований установлено, что программную обработку осциллограмм следует производить в двух частотных диапазонах [16, 17]:

- 1) Среднечастотный (до 10 кГц) характеризует процессы переноса капель электродного металла в сварочную ванну;
- 2) Низкочастотный (до 10 Гц) характеризует процесс формирования сварочной ванны (сварного шва).

Можно выделить следующие стадии процесса переноса (рис.3):

- горения дуги (образования капли) с длительностью t_d ;
- короткое замыкание в сварочную ванну (отрыв капли) длительностью t_k .

Полный цикл процесса переноса: $T_{ц} = t_d + t_k$.

Для исследования процессов переноса электродного металла применяют специальные информационно-измерительные комплексы [18, 19]. На рис.4 представлены картины образования капли за цикл переноса её в сварочную ванну, соответствующие моментам времени обозначенными точками 1..4 на рис.3. Кадры получены высокоскоростной съёмкой и совмещены с осциллограммами тока и напряжения с помощью информационно-измерительного комплекса, разработанного в Белорусско-Российском университете [20].

Стабильность процесса сварки обеспечивается формированием капель одинаковых размеров. Авторами работ [13, 18, 21] исследовались различные критерии стабильности процесса переноса электродного металла. В работах [22, 23] установлено, что наиболее тесную связь с размером (диаметром) капли имеет энергия дуги на этапе её формирования (за время t_d), которая определяется:

$$q_d = \sum (i_d \times u_d \times \Delta t),$$

где $i_d \times u_d$ – мгновенные значения сварочного тока и напряжения на дуге; Δt – шаг дискретизации сигнала с датчиков тока и напряжения.

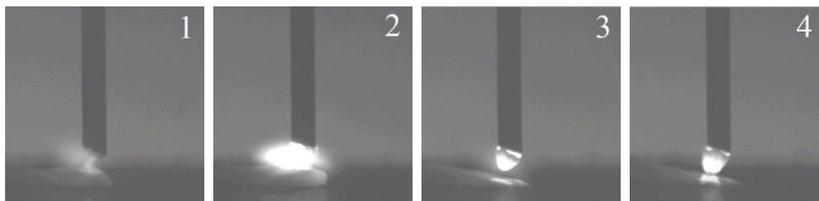


Рис.4. Картины формирования капли расплавленного металла

Энергия дуги на этапе формирования капли электродного металла зависит от параметров режима сварки и изменяется под действием внешних возмущений на систему источник питания – сварочная дуга. Образцовые значения q_d определяются при сварке контрольных образцов определённого материала на фиксированных параметрах режима сварки: сварочного тока, напряжения на дуге, скорости сварки, вылете электрода, расходе защитного газа и поступают в модуль обработки данных с регистраторов.

Для исследования процесса формирования сварочной ванны или сварного шва производится усреднение мгновенных значений тока и напряжения, снимаемых регистратором сварочных процессов с частотой 10 кГц. При усреднении 1000 точек получаем данные о параметрах режима сварки с частотой 10 Гц (рис.5). Отклонения сварочного тока и напряжения от установленных технологическим процессом сварки значений приводят к изменению геометрических размеров сварного шва, к образованию дефектов, таких как: непровар, прожог, поры, трещины и т.д.

Методика интеллектуального контроля сварочных работ включает следующие основные шаги.

1. При обнаружении момента зажигания дуги (резкий рост напряжения практически от нуля до рабочего) идёт расчёт энергии дуги q_d до момента короткого замыкания капли в сварочную ванну (ток

возрастает от рабочего до тока короткого замыкания). Значения энергии дуги q_d сохраняются в память регистратора.

Результаты регистрации мгновенных значений энергии дуги представлены в таблице 1.

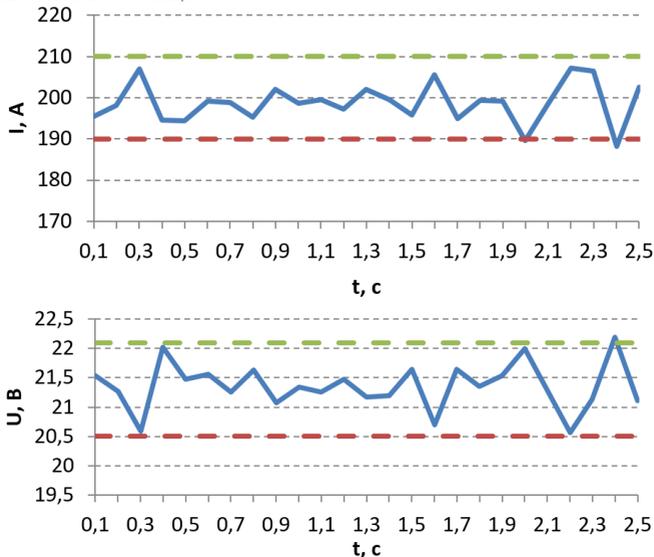


Рис.5. Средние значения тока и напряжения, получаемые с регистратора с частотой 10 Гц

2. За интервал времени 0,5 с (постоянная времени кристаллизации сварочной ванны) происходит расчёт коэффициента вариации энергии дуги KVq_d :

$$KVq_d = \frac{\sigma_{q_d}}{\bar{q}_d},$$

где σ_{q_d} – среднееквадратичное отклонение значений энергии дуги q_d ; среднее значение энергии дуги q_d , полученных в течение 0,5с.

Результаты расчета коэффициента вариации энергии дуги представлены в таблице 2.

Таблица 1. Результаты регистрации мгновенных значений энергии дуги в течение 2,5 с

№ п/п	Время, с				
	0,5	1	1,5	2	2,5
	Энергия дуги q_d				
1	5,069	5,666	8,051	8,197	5,023
2	5,292	5,823	8,475	7,729	5,593
3	6,857	6,86	5,241	8,468	6,254

4	5,598	6,006	6,24	6,39	6,566
5	6,65	5,97	6,017	7,129	6,635
6	6,844	6,479	7,595	6,658	6,542
7	5,49	6,709	6,83	5,451	5,443
8	6,425	5,975	7,828	6,75	5,374
9	5,58	6,685	5,856	3,998	4,686
10	6,304	6,242	5,434	5,48	7,332
11	3,489	4,692	6,535	8,164	8,448
12	1,286	2,224	5,405	6,142	9,39
13	7,441	3,656	5,506	9,965	8,455
14	10,99	13,18	2,87	10,64	5,623
15	9,41	10,35	10,6	8,7	6,338

Таблица 2. Результаты расчета коэффициента вариации энергии дуги

Время, с	0,5	1	1,5	2	2,5
KV _д	0,34	0,38	0,26	0,23	0,20

3. Мгновенные значения сварочного тока и напряжения усредняются на регистраторе и передаются в модуль обработки данных с частотой 10 Гц. (см. рис.6).

4. Общая оценка работы сварщика и оборудования складывается из трех компонентов (оценки сварочного тока I_o , оценки напряжения U_o и оценки стабильности процесса сварки на основе коэффициента вариации энергии дуги $KV_{qд}$) выставляется каждые 0,5 с. При выходе параметра за границы заданного допуска в течение 0,5 с и более – оценка по параметру выставляется равной нулю. В рассматриваемом случае максимальное значение сварочного тока составляет 22,1 А, минимальное значение сварочного тока составляет 20,5 А; максимальное значение напряжения составляет 210 В, минимальное значение напряжения составляет 190 В. Значение коэффициента вариации энергии дуги $KV_{qд}$ не должно превышать 0,3 [23-26].

Оценка сварочного тока выполняется по следующей формуле:

$$I_o = \frac{|\overline{I_{0,5}} - I_{mid}|}{(I_{max} - I_{mid})},$$

где $\overline{I_{0,5}}$ – среднее значение сварочного тока в течение 0,5 с; I_{mid} – среднее между максимальным и минимальным значением сварочного тока (в рассматриваемом случае $I_{mid} = 21,3$ А); I_{max} – максимальное значение сварочного тока.

Оценка напряжения выполняется по следующей формуле:

$$U_o = \frac{|\overline{U}_{0,5} - U_{mid}|}{(U_{max} - U_{mid})},$$

где $\overline{U}_{0,5}$ – среднее значение напряжения в течение 0,5 с; U_{mid} – среднее между максимальным и минимальным значением напряжением (в рассматриваемом случае $U_{mid} = 200$ В); U_{max} – максимальное значение напряжения.

На основании экспертных оценок определены уровни значимости для оценки сварочного тока ($\delta I_o = 3$), напряжения ($\delta U_o = 3$) и коэффициента вариации энергии дуги ($\delta KVq_d = 4$). Соответственно, оценка сварочных работ по 10-бальной системе рассчитывается по формуле:

$$Mw = \delta I_o \times I_o + \delta U_o \times U_o + \delta KVq_d \times KVq_d.$$

Результаты оценки работы сварщиков и сварочного оборудования для рассматриваемого случая представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты оценки работы сварщиков и сварочного оборудования

Время, с	Uo	Io	KVq _d	Оценка (Mw)
0,5	197,95	21,38	0,34	5,1
1	197,99	21,40	0,38	5,0
1,5	199,94	21,26	0,26	6,3
2	199,61	21,27	0,23	6,7
2,5	196,37	21,56	0,20	5,3

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описана интеллектуальная система контроля сварочных работ, содержащая аппаратную и программную часть. Аппаратная часть в виде регистратора обеспечивает получение в реальном времени параметров сварочных процессов для оценки качества сварочных работ. Программная часть реализует обработку данных и выставление оценок в зависимости от параметров сварочных процессов.

Представленная в статье интеллектуальная система контроля позволяет в реальном времени (с интервалом 0,5 с) получать оценки качества сварочных работ в зависимости от стабильности процесса сварки и отклонений параметров режима сварки от оптимальных значений, а также предупреждать сварщика и руководителя сварочных работ о выходе параметров режима сварки за пределы допустимых значений посредством генерации звукового сигнала на пульте.

Предложенная методика интеллектуального контроля сварочных работ отличается использованием аддитивного показателя

нормированных значений отклонений тока сварки и напряжения от оптимальных значений, использованием коэффициента вариации энергии дуги на этапе образования капель электродного металла. Результатом применения предложенной методики в разработанной интеллектуальной системе является оценка сварочных работ по 10-бальной шкале, которая передается на пульт сварщика с интервалом 0,5 с и на сервер. Полученная информация может использоваться сварщиками и руководителями сварочных работ для принятия мер по устранению отклонений параметров сварочных процессов от оптимальных, что способствует повышению качества сварки.

Литература

1. Baicun Wanga , S. Jack Hub , Lei Suna , Theodor Freiheita. Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives. // Journal of Manufacturing Systems. Volume 56, July 2020, pp. 373-391.
2. Колесников О. И., Юшин А. А., Гончаров Н. Г. Анализ применения автоматизированных систем контроля выполнения сварочных работ на объектах трубопроводного транспорта // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. Т. 8. № 6. С. 686-691.
3. ESAB: официальный сайт компании / WELDQAS. <https://www.esab.ru/ru/ru/products/esab-digital-solutions-eds/quality-assurance/weldqas.cfm>.
4. КЕМППИ: официальный сайт / Программное обеспечение для управления сварочным производством. <https://www.kemppi.com/ru/offering/category/programmnoe-obespecenie-2/programmnoe-obespecenie-dla-upravlenia-svarocnym-proizvodstvom-2/>.
5. Fronius: официальный сайт / WELDCUBE. <https://www.fronius.com/en/welding-technology/innovative-solutions/weldcube>
6. EWM: официальный сайт / Ewm Xnet – система управления сварочными процессами согласно концепции Welding 4.0. <https://www.ewm-group.com/ru/produkte/software/ewm-xnet.html>.
7. LORCH: официальный сайт / Система документирования сварочных данных Q-DATA. <https://lorch.ru/qdatalorch/>.
8. ИТС: официальный сайт / Регистратор параметров сварочных процессов РСП-102Д. http://www.npfets.ru/catalog/ets/prochee/registratoru/registrator_parametrov_svarocnhuh_processov_rsp_102d/.
9. Казаков С. И. Информационно-компьютерные технологии в сварочном производстве. Курган : Изд-во Курганского гос. университета, 2013. 114 с.
10. Сас А. В., Чернов А. В. Информационно-измерительные системы в управлении сварочным производством : монография. Новочеркасск : Изд-во Южно-Российского гос. политехнического университета, 2008. 148 с.

11. Оценка сварочных свойств оборудования с инверторными источниками питания по энергетическим характеристикам / Э. А. Гладков [и др.] // Сварка и диагностика. 2011. № 1. С. 31-35.
12. Куликов, В. П. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки / В. П. Куликов. – Минск : Экоперспектива, 2003. – 416 с.
13. Потапьевский А.Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Ч.1 / А.Г. Потапьевский.– К.: Экотехнология, 2007. – 192 с.
14. Choi S.K. Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW - Part 1: Globular and Spray Transfer Modes / S.K Choi., C.D. Yoo, Y.S Kim // Welding Journal. 1998, № 11, p. 38-44.
15. Choi S.K. Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW - Part 2: Short-Circuit Transfer Mode / S.K Choi., C.D. Yoo, Y.S Kim// Welding Journal. 1998. № 12. p. 45-51.
16. Юшин А.А. Разработка критериев оценки сварочных свойств установок для дуговой сварки с управляемым каплепереносом: автореф. дис. канд. техн. наук (15.03.2012) / А.А. Юшин (МГТУ); – Москва, 2012. – 16 с.
17. Оценка сварочных свойств оборудования с инверторными источниками питания по энергетическим характеристикам / Э.А. Гладков, А.А. Юшин, Р.А. Перковский и др. // Сварка и диагностика. 2011. № 1. – С. 31-35.
18. Ленивкин В.А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах: 2-е изд. / В.А. Ленивкин, Н.Г. Дюргеров, Х.Н. Сагиров. – М.: Гэфест, 2011. – 368 с.
19. Сараев, Ю.Н. Комплекс для исследования процессов дуговой сварки / Ю.Н. Сараев, А.Г. Лунев, А.С. Киселёв, А.С. Гордынец, М.В. Тригуб // Автоматическая сварка. – 2018. – № 8. – С. 15-24.
20. Болотов С.В., Хомченко А.В., Шульга А.В., Болотова Е.Л. Информационно-измерительный комплекс для исследования процессов плавления и переноса электродного металла при дуговой сварке // Вестник Брянского государственного технического университета / 2020. – Т. 2020, № 6 (91). – С. 4-11.
21. Pan J. Arc welding control, Jiluan Pan, Woodhead Publishing Limited, Cambridge. England. 2003. – 604 p.
22. Bolotov S.V. Investigation of the Criteria for Evaluating Electrode Metal Transfer in Short Circuit Gas-Shielded Arc Welding [Electronic resource] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2021. – №1118. P.0120003.
23. Букаров В.А. Оценка стабильности дуговой сварки по осциллограммам процесса с использованием статистических методов / В.А. Букаров, С.С. Ермаков, Т.А. Дорина // Сварочное производство. 1990. № 12. с. 31-33.
24. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки. Т. 2 / Б.М. Березовский. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2003. – 601 с.
25. Лебедев В.А. Управление проплавлением при механизированной сварке и наплавке / В.А. Лебедев // Автоматическая сварка. 2011. № 1. С.3-11.
26. Babkin A.S. Identification of Welding Parameters for Quality Welds in GMAW / A.S. Babkin, E.A. Gladkov// Welding Journal, 2016, №1, pp. 37-48.