

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.791

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-6-4-11

С.В. Болотов, А.В. Хомченко, А.В. Шульга, Е.Л. Болотова

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ И ПЕРЕНОСА
ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ**

Приведено описание информационно-измерительного комплекса для осуществления дуговой сварки в защитных газах с регистрацией параметров режима и высокоскоростной съемкой каплепереноса электродного металла. Разработано программное обеспечение, позволяющее управлять комплексом и определять энергетические парамет-

ры на отдельных стадиях процесса переноса. Представлены результаты исследования процесса СМТ (холодный перенос электродного металла).

Ключевые слова: дуговая сварка, высокоскоростная съемка, регистратор, сварочные процессы, электродный металл.

S.V. Bolotov, A.V. Khomchenko, A.V. Shulga, E.L. Bolotova

**INFORMATION-MEASURING COMPLEX FOR INVESTIGATION
OF MELTING AND ELECTRODE METAL TRANSFER
AT ARC WELDING**

The purpose of the paper consists in the description of the procedure for investigations and software-hardware means for arc welding with a melting electrode in protective gas environment with the controlled transfer of electrode metal and its visualization.

For investigations of quick electrode metal transfer processes there was used Evercam 1000-4-C digital video-camera and RKDP-0401 recorder of welding mode parameters.

For video-control of the process there was used a method of active illumination with the further image filtration. It is determined that the visualization of a welding drop transfer dynamics during arc welding with melting electrode in protective gases should be carried out in the infrared range on one side limited with the curve of a spectral transmission of light filters – 950 nm, and on the other side of a matrix sensitivity spectral curve of a rapid camera -1050 nm.

There is developed software in the environment of the LabVIEW graphical programming allowing the fulfillment of adjustment and programming welding mode parameters and high-speed shooting, device synchronization, superposition on oscillograms of electric parameters of the electrode metal image transfer, definition of power characteristics at different interval of drop transfer.

The CMT (Cold Metal Transfer) process with the aid of the equipment of Fronius TransPuls Synergic 3200 is investigated. It is defined that for arc welding in protective gases an optimum frequency of video-shooting is 1500-2000 shots per second at resolution from 640×608 pixels to 320×400 pixels that allows analyzing efficiently rapid processes of drop transfer.

Key words: arc welding, high-speed shooting, recorder, welding processes, electrode metal.

Введение

Одним из способов совершенствования процессов дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитных газов является управление переносом электродного металла. Разработки в данном направлении ведут многие производители сварочного оборудования. Компании *Lincoln Electric* (США), *Kemppi* (Финляндия), *EWM* (Гер-

мания), *ESAB* (Швеция), *СЭЛМА-ИТС* (Россия) реализуют алгоритмы высокоскоростного цифрового управления формой сварочного тока и напряжения на дуге [1]. Фирма *Fronius* (Австрия) разработала процесс СМТ (*Cold Metal Transfer* - холодный перенос электродного металла). Суть технологии заключается в том, что при корот-

ком замыкании капли расплавленного металла электрода, попадая в сварочную ванну, снижают передаваемую электрическую энергию и за счёт отвода проволоки вверх отделяют её. В результате снижается тепловложение в основной металл, увеличивается скорость сварки, уменьшается разбрызгивание электродного металла, становится более стабильным процесс горения дуги [2].

Разработка нового оборудования для механизированной дуговой сварки с

Методика исследований

При изучении процессов управляемого переноса электродного металла при дуговой сварке возникают трудности. Первая связана с высокой скоростью перехода капли в сварочную ванну, которая может достигать 300 Гц [4]. При этом частота работы инвертора сварочного источника питания составляет десятки килогерц. Эта проблема устраняется использованием цифровых скоростных видеокамер с частотой

управляемым отрывом капель электродного металла требует всестороннего изучения процессов тепломассопереноса в сложной электродинамической системе источник питания – дуга – сварочная ванна, исследований влияния энергетических параметров режима сварки на кинетику плавления и переноса электродного металла. Применяемые при этом исследовательские комплексы являются уникальными [3].

той регистрации в несколько тысяч кадров в секунду и современных регистраторов параметров режима сварки с частотой оцифровки до десятков мегагерц. Вторая трудность связана с мощным световым излучением сварочной дуги и устраняется использованием активной подсветки зоны сварки [5].

На рис.1 представлена схема системы видеорегистрации с активной подсветкой.

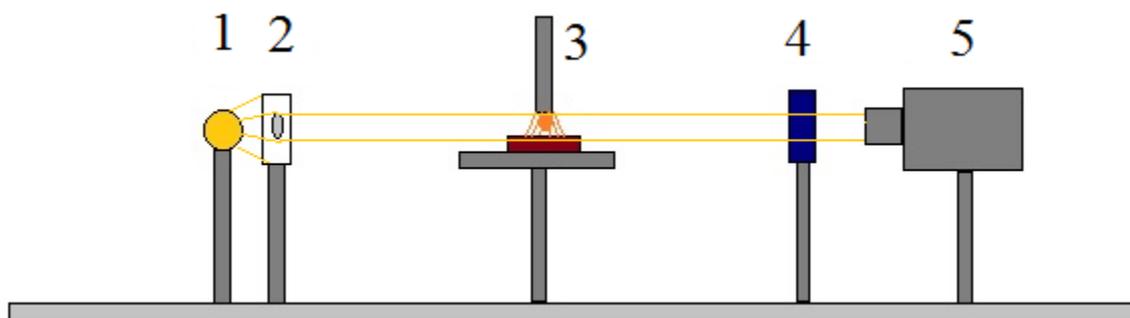


Рис. 1. Схема активной подсветки зоны сварки: 1 - источник активной подсветки; 2 - фокусирующая линза; 3 - сварочный стол; 4 - блок фильтров; 5 - камера высокоскоростной съемки

В качестве источника мощного светового излучения использовалась галогенная лампа *H1 12V 55W P14,5S* при питании от источника регулируемого напряжения *ATTEN TPR3020S* в диапазоне от 10 до 14 В. Мощность источника подсветки, типы используемых фильтров зависят от параметров режима сварки, материала свариваемых деталей и электродной проволоки, защитного газа.

Для наблюдения за процессом управляемого переноса электродного металла использовалась камера высокоскоростной съемки *Evercam 1000-4-C*, позволяющая с помощью *CMOS* сенсора вести съемку с частотой от 1000 до 22500 к/с, минимальное время экспозиции - 1 мкс с шагом в 1 мкс, сигнал внешнего синхронизатора – *TTL* [6].

При визуализации сварочного процесса необходимо учитывать особенности

физических явлений, сопровождающих процессы генерации дуги газового разряда и плавления основного и расплавленного металла. Спектральный состав регистрируемого камерой излучения в основном состоит из множества узких и плотно расположенных интенсивных линий, испускаемых при ударной ионизации газовой среды, а также соударения электронов дуги с атомами металла при его разогреве и зависит от способа и режимов сварки, физических характеристик газовой среды, сварочных материалов и изделия (рис. 2, кривая 1). Следует отметить что стабилизация спектра излучения плазмы газового разряда как по спектру так и по интенсивности представляет собой сложную задачу, зача-

стую невыполнимой в силу приоритета режимов сварки. В свою очередь нагретый до высоких температур металл сам является источником высокоинтенсивного теплового излучения с непрерывным спектром с максимумом спектральной плотности энергетической светимости в инфракрасной области спектра. Интегральная интенсивность излучения расплавленного металла (сварочной капли) пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры. При этом скорость убывания интенсивности при охлаждении капли в инфракрасной области меньше, чем в видимой и ультрафиолетовой, что и определило выбор нами спектрального диапазона визуализации процесса.

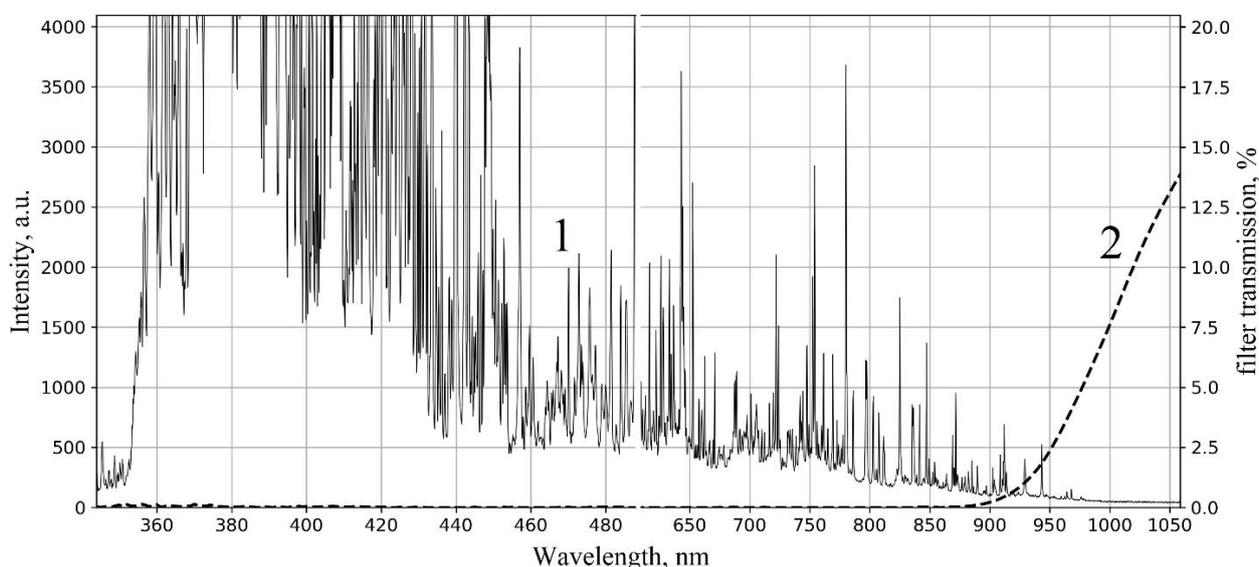


Рис. 2. Спектральный состав сварочной дуги (1), зарегистрированный спектрофотометром в области 343-1058 нм, а также спектр пропускания светофильтров (2), выделяющих спектральный диапазон визуализации сварочного процесса

На рис. 2 показан зарегистрированный во время сварочного процесса спектральный состав излучения, испускаемый при дуговой сварке в среде CO_2 проволокой Св08Г2С диаметром 1 мм при сварочном токе $I_{св}=220$ А и напряжении на дуге $U_{д}=25$ В. Регистрация проводилась спектрофотометром *SL40-2* в диапазоне длин волн от 343 до 1058 нм (ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазон), что перекрывает спектральный диапазон чувствительности скоростной камеры. Как видно из рисунка максимум

интенсивности излучения, находящийся в ультрафиолетовой области, в основном имеет линейчатую природу. При переходе в длинноволновую интенсивность линейчатого спектра убывает, оставляя небольшое спектральное «окно» теплового излучения в диапазоне от 950 до 1050. Пунктирной линией 2 показан спектральный коэффициент пропускания светофильтров, применяемых для отсечения излучения плазмы сварочной дуги. Таким образом, визуализация динамики сварочной капли осуществлялась в инфракрасном диапа-

зоне, с одной стороны ограниченном кривой спектрального пропускания светофильтров, а с другой стороны спектраль-

ной кривой чувствительности матрицы скоростной камеры.

Описание комплекса

Разработанный в Белорусско-Российском университете информационно-измерительный комплекс (рис. 3) выполняет следующие функции:

- дуговую сварку в среде защитных газов с регулируемыми параметрами режима (сварочного тока, напряжения на дуге, расхода защитного газа или смеси газов);

- автоматическое перемещение сварочной горелки с программируемой скоростью;

- скоростную видеосъемку и визуализацию процесса переноса электродного металла;

- регистрацию и обработку мгновенных значений параметров режима дуговой сварки;

- синхронизацию начала и окончания сварки с записью в память компьютера параметров режима и скоростной видеосъемки;

- программное совмещение осциллограмм энергетических процессов с картинами переноса электродного металла;

- программную обработку экспериментальных данных.

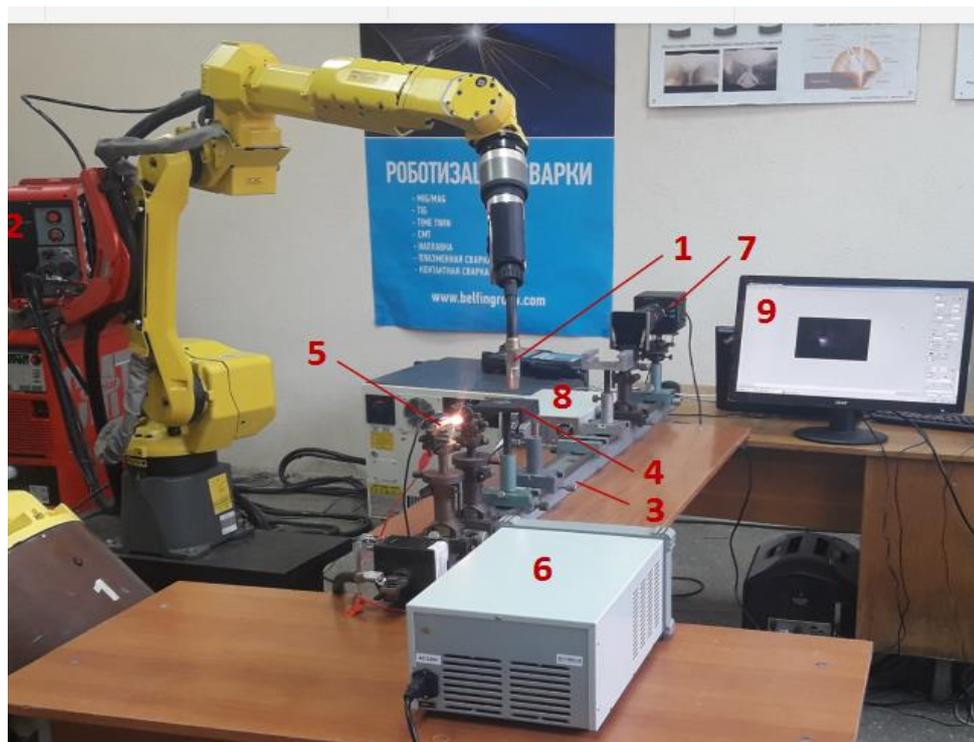


Рис. 3. Внешний вид информационно-измерительного комплекса: 1- сварочная горелка в составе робототехнического комплекса; 2- сварочный источник питания; 3- оптическая скамья; 4- сварочный стол; 5- источник светового излучения с фокусирующей линзой; 6- блок питания источника света; 7- камера высокоскоростной съемки с набором фильтров; 8- регистратор параметров сварочных процессов с датчиками; 9 - персональный компьютер с разработанным программным обеспечением

Сварка осуществляется с помощью цифрового источника инверторного типа *Fronius TransPuls Synergic 3200* на токах

до 320 А. Наряду со стандартными методами сварки (*MIG/MAG*), аппарат поддерживает сварочный процесс *CMT*. Переме-

шение сварочной горелки производится автоматически с использованием робота *FANUC Robot ARC Mate 100iC*.

Запись параметров режима сварки осуществляется с помощью регистратора РКДП-0401, выполненного на базе платы модуля ввода-вывода *E14-440D* для 14-разрядного аналого-цифрового преобразования. Блок гальванической развязки платы содержит широкополосные изолирующие усилители *AD215BY* с полосой пропускания до 120 кГц, при этом регистратор может снимать сигналы с датчиков частотой до 100 кГц на один канал, что позволяет регистрировать процессы переноса электродного металла.

Применяемые датчики параметров режима:

- датчик мгновенных значений сварочного тока типа на эффекте Холла *LT 1000-SI*: 1...1000 А, приведенная погрешность 1%;

- датчик мгновенных значений напряжения типа *LV 100/SP83*: до 1000 В, приведенная погрешность 0,7%;

- датчик расхода защитного газа типа *AWM5104*: 0...20 л/мин, приведенная погрешность 1%.

Разработано программное обеспечение в среде графического программирования *LabVIEW* [7], позволяющее осуществлять:

- настройки и программирование параметров высокоскоростной съемки, режима сварки, скорости перемещения горелки;

- синхронное начало и окончания сварки с записью параметров режима и скоростной видеосъемки;

Обработка результатов исследований

На рис. 4 представлены осциллограммы сварочного тока, напряжения на дуге и мгновенной мощности для процесса СМТ (холодный перенос электродного металла). Частота сбора данных составляла 20 кГц. Частота видеосъемки - 2000 кадров в секунду при экспозиции 1/2000 с и разрешении 640×400 пикселей. Между курсором 1 и курсором 2 расположен полный цикл переноса капли расплавленного ме-

- регистрацию и обработку мгновенных значений параметров режима дуговой сварки, наложение на осциллограммы картин переноса электродного металла, определение энергетических параметров на разных интервалах процесса каплепереноса.

Для запуска информационно-измерительного комплекса необходимо включить сварочный источник питания, устройство перемещения горелки (робот), блок питания источника подсветки, компьютер с установленным программным обеспечением. После производится предварительная фокусировка источника светового излучения на сварочную дугу, фокусировка камеры высокоскоростной съемки, установка требуемых фильтров. Далее программно задаются параметры режима сварки, высокоскоростной съемки и регистрации сигналов с датчиков. Запуск процесса синхронизированной записи осуществляется с персонального компьютера, сигнал с которого посредством последовательного порта *USB* поступает на модуль цифрового входа-выхода регистратора параметров сварочных процессов. Далее через цифровые выходы модуля регистратора с использованием твердотельных реле («сухого» контакта) производится запуск источника питания активной подсветки зоны сварки, сварочного источника питания, сварочного робота для перемещения горелки. В момент зажигания дуги осуществляется запуск высокоскоростной съемки и записи параметров режима сварки регистратором.

талла, а на рис.6 представлены отдельные видеокadres процесса, соответствующие отметкам 1...6 на осциллограмме. Кадру 1 соответствует начало зажигания дуги, при этом происходит прямая подача проволоки (стрелка вниз). На этапе горения дуги (кадры 2 и 3) происходит формирование капли расплавленного металла. Кадр 4 соответствует режиму короткого замыкания капли в сварочную ванну. При этом про-

исходит резкое падение напряжения u_d и ограничение сварочного тока $i_{св}$ на уровне 95 А (кадр 5), суммарная электрическая мощность p при этом стремится к нулю (холодный перенос). Кадру 6 соответствует реверсивная (вверх) подача проволоки,

способствующая отрыву капли расплавленного металла и последующему повторному зажиганию дуги. Длительность одного цикла переноса составила 14 мс, что соответствует частоте отрыва капель 71 Гц.

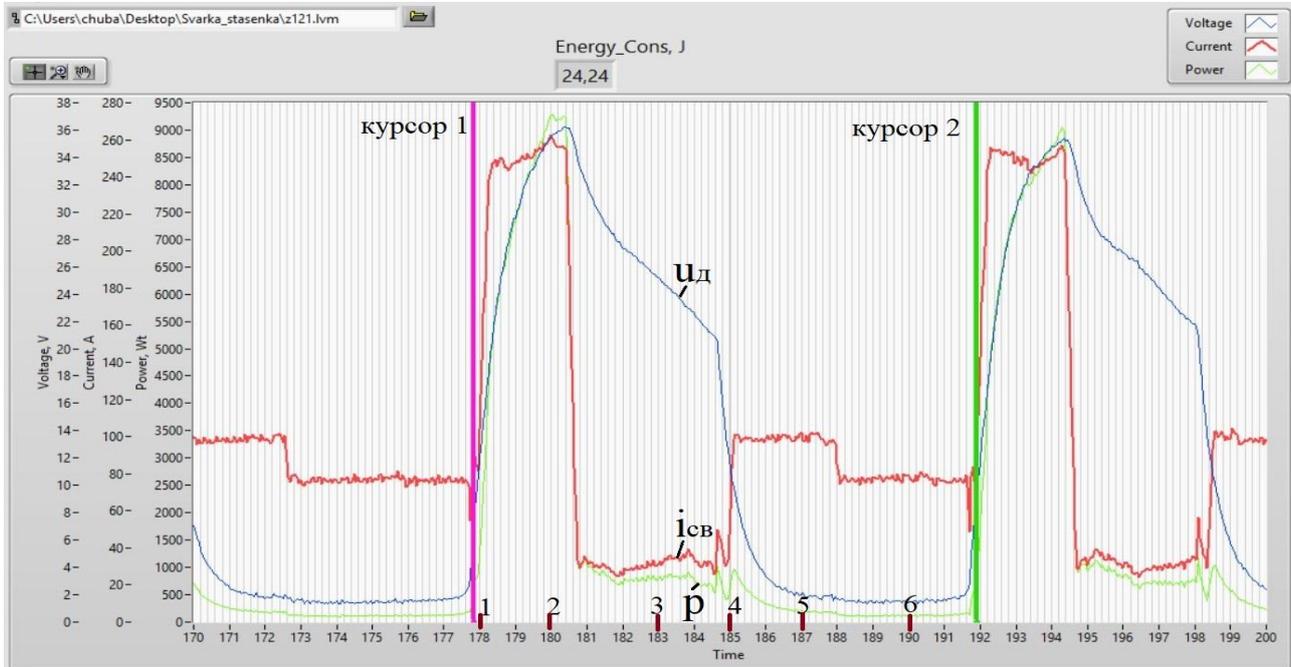


Рис. 4. Осциллограммы параметров сварочного процесса:
 u_d - напряжения на дуге, $i_{св}$ - сварочного тока, p – мгновенной мощности

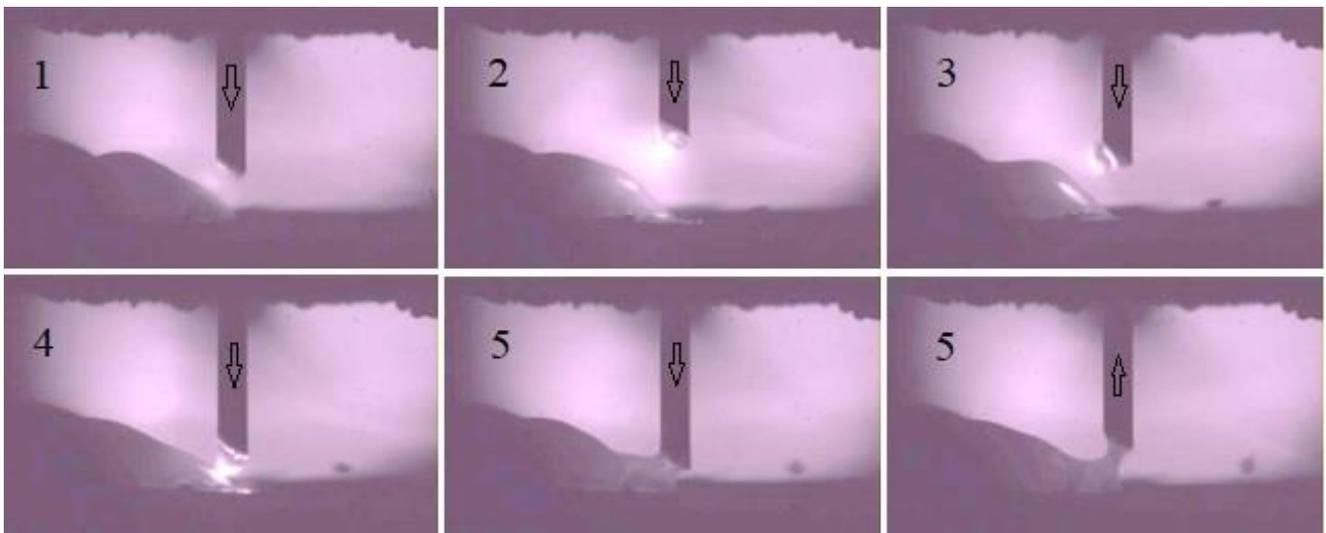


Рис. 5. Видеокadres процесса плавления и переноса электродного металла

Разработанная программа позволяет с помощью перемещаемых по осциллограммам курсоров не только отображать кадры видеосъемки, соответствующие данному моменту времени, но и вычислять мини-

мальные максимальные и средние значения измеряемых величин, энергетические параметры на заданном с помощью курсоров интервале времени. Так на рис. 4 производится индикация энергии (*Ener-*

gy_Cons=24,24 Дж), затраченной на формирование одной капли расплавленного металла (интервал времени между курсорами 1 и 2).

В ходе экспериментальных исследований установлено, что для процесса дуговой сварки в защитных газах оптимальная

Выводы

1. Сварочная дуга обладает широким спектром излучения от ультрафиолетовой до ближней инфракрасной области. Для видеонаблюдения за процессом сварки использовали метод активной подсветки с последующей фильтрацией изображения. Установлено, что визуализацию динамики перехода сварочной капли при дуговой сварке плавящимся электродом в защитных газах следует производить в инфракрасном диапазоне, с одной стороны ограниченным кривой спектрального пропускания светофильтров – 950 нм, а с другой стороны спектральной кривой чувствительности матрицы скоростной камеры – 1050 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев В.А. Тенденции развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла // Автоматическая сварка. 2010. № 10. С. 45–53.
2. Бондаренко В.Л. Дуговая сварка с импульсной подачей электродной проволоки – процесс СМТ, предложенный фирмой «Фрониус» // Автоматическая сварка. 2004. № 12. С. 55–58.
3. Сараев Ю.Н., Лунев А.Г., Киселёв А.С., Гордынец А.С., Тригуб М.В. Комплекс для исследования процессов дуговой сварки // Автоматическая сварка. 2018. № 8. С. 15–24.
4. Сараев Ю.Н., Чинахов Д.А., Ильященко Д.П., Киселёв А.С., Гордынец А.С. Исследование стабильности плавления и переноса электродного

частота сбора данных регистратором составляет 10-20 кГц, а частота видеосъемки 1500-2000 кадров в секунду при разрешении от 640×608 до 320×400 пикселей, что позволяет эффективно изучать быстропротекающие процессы каплепереноса.

2. Для исследования быстропротекающих процессов переноса электродного металла при дуговой сварке оптимальная частота регистрации данных составляет 10-20 кГц, а частота видеосъемки 1500-2000 кадров в секунду.

3. Разработанное программное обеспечение в среде *LabVIEW* позволяет задавать параметры режима сварки и сбора данных, управлять устройствами информационно-измерительного комплекса и вычислять энергетические параметры на разных стадиях процесса плавления и переноса электродного металла.

металла в процессе дуговой сварки плавящимся электродом от источников питания с различными динамическими характеристиками // Сварочное производство. 2016. № 12. С. 7–16.

5. Перковский Р. Видеосъемка сварочных процессов. Сложности и специфика наблюдения // Системы безопасности: спец. приложение "Video & Vision". 2014. С. 90-93.
6. Высокоскоростные камеры EVERCAM. URL: [http:// evercam.ru/dokumentatsiya](http://evercam.ru/dokumentatsiya) (дата обращения: 19.03.2020).
7. LabVIEW - автоматизация научных исследований . URL: [http:// www.labview.ru](http://www.labview.ru) (дата обращения: 19.03.2020).

1. Lebedev V.A. Development trends in mechanical welding with controlled electrode metal transfer // Machine Welding. 2010. No. 10. pp. 45-53.
2. Bondarenko V.L. Arc welding with electrode wire pulse feed – SMT process offered by “Fronius” company // Machine Welding. 2004. No.12. pp. 55-58.
3. Saraev Yu.N., Lunev A.G., Kiselyov A.S., Gordynets A.S., Trigub M.V. Complex for investigations arc welding processes // Machine Welding. 2018. No.8. pp. 15-24.

4. Saraev Yu.N., Chinakhov D.A., Iliyashchenko D.P., Kiselyov A.S., Gordynets A.S. Investigations of melting stability and electrode metal transfer during arc welding with melting electrode from power source with different dynamic characteristics // Welding Production. 2016. No.12. pp. 7-16.
5. Perkovsky R. Welding video filming. Complexities and peculiarity of supervision // Safety Systems: “Video & Vision”. 2014. pp. 90-93.

6. High-speed EVERCAM Cameras. URL: <http://evercam.ru/dokumentatsiya> (address date: 19.03.2020).

7. LabVIEW – Scientific Investigation Automation. URL: <http://www.labview.ru> (address date: 19.03.2020).

Ссылка для цитирования:

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. № 6. С. 4-11. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-6-4-11.

Статья поступила в редакцию 27.03.20.

Рецензент: д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премий Президента и Правительства РФ, Степанов Ю.С.

Статья принята к публикации 25.04.20.

Сведения об авторах:

Болотов Сергей Владимирович, к.т.н., доцент, декан электротехнического факультета Белорусско-Российского университета, e-mail: s.v.bolotov@mail.ru.

Хомченко Александр Васильевич, д.ф.-м.н., доцент, зав. кафедрой «Физика» Белорусско-Российского университета, e-mail: avkh@mogilev.by.

Болотов Sergey Vladimirovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof., Dean of the Faculty “Electrical Engineering”, Belorussian-Russian University, e-mail: s.v.bolotov@mail.ru.

Khomchenko Alexander Vasilievich, Dr. Sc. Physical-Math., Assistant Prof., Head of the Dep. “Physics”, Belorussian-Russian University, e-mail: avkh@mogilev.by.

Шульга Александр Васильевич, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры «Физика» Белорусско-Российского университета, e-mail: ashulga@tut.by.

Болотова Евгения Леонидовна, инженер Центра сертификации и испытаний Белорусско-Российского университета, e-mail: e.l.bolotova@mail.ru.

Shulga Alexander Vasilievich, Can. Sc. Physical-Math, Assistant Prof., Assistant Prof. of the Dep. “Physics”, Belorussian-Russian University, e-mail: ashulga@tut.by.

Bolotova Evgenia Leonidovna, Engineer of the Center for Certification and Testing, Belorussian-Russian University, e-mail: e.l.bolotova@mail.ru.