

КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Ю. Н. САРАЕВ¹, А. Г. ЛУНЕВ¹, А. С. КИСЕЛЕВ², А. С. ГОРДЫНЕЦ², М. В. ТРИГУБ³

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН.

634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4. E-mail: litsin@ispms.tsc.ru.

²Национальный исследовательский Томский политехнический институт.

634004, г. Томск, просп. Ленина, 30. E-mail: kas@tpu.ru

³Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН.

634055, г. Томск, площадь акад. Зуева, 1. E-mail: trigub@tpu.ru

В работе представлены результаты разработки и изготовления уникального исследовательского комплекса для изучения быстротекущих процессов тепломассопереноса при дуговой сварке плавящимся электродом. Показаны преимущества разработанного комплекса перед традиционно применяемыми с использованием кино- и видеокамер с теневым принципом регистрации характеристик тепломассопереноса. Исследовали быстротекущие процессы с применением высокоскоростной видеосъемки с подсветкой дугового промежутка лучом Cu-VI-лазера, улучшающего визуализацию изучаемого объекта — процесса плавления и переноса каждой капли электродного металла в условиях интенсивного светового излучения от электрической дуги. В статье приведены поясняющие схемы, алгоритмы управления, видеокдры отдельного сварочного микроцикла, примеры записи осциллограмм и графические представления изменений их количественных значений. Библиогр. 13, табл. 1, рис. 14.

Ключевые слова: сварка, наплавка, видеосъемка, плавление, тепломассоперенос, лазер, управление, стабильность, электрическая дуга, сварка плавящимся электродом

Процессы нагрева и плавления сварочного электрода или проволоки, формирования и переноса капель электродного металла при сварке во многом определяют стабильность прочностных свойств неразъемных соединений. Характер плавления и переноса электродного металла при сварке плавлением определяется большим количеством физических явлений: тепло- и массопереноса, газо- и термодинамики, электромагнитных процессов, протекающих в дуге, на поверхности и в объеме электрода, расплавленных капель как основного, так и электродного металла [1–3].

Анализ работ, посвященных кинетике плавления электродного металла, показывает, что перенос металла с электрода в сварочную ванну происходит в виде капель разного диаметра [4, 5]. Механизм переноса зависит от многих факторов: силы тяжести, действующей на каплю, силы поверхностного натяжения жидкого металла, электромагнитных сил, давления паров испаряющегося металла и других. Исследование кинетики плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну неразрывно связано с регистрацией быстротекущих процессов. В зависимости от применяемого способа сварки плавящимся электродом характер плавления и переноса может изменяться. Прежде всего это связано с различием в действии на каплю электродного металла, находящуюся на торце электрода, комплекса сил, определяющих не только частоту перехода электродно-

го металла в сварочную ванну, но и длительность пребывания расплавленного металла под высокотемпературным воздействием электрической дуги. Последнее всецело определяет интенсивность микрометаллургических реакций в капле и ванне, от которой зависят качественные и прочностные свойства формируемого неразъемного соединения [6, 7].

На протяжении длительного времени одним из основных методов исследований быстротекущих процессов плавления и переноса электродного металла является скоростная видеосъемка, которая, как правило, осуществляется синхронно с регистрацией основных энергетических параметров технологического процесса. При всем многообразии методов визуализации процессов плавления и переноса электродного металла в сварочную ванну, до сих пор малоизученными являются быстротекущие процессы на стадии плавления и перехода расплавленного металла в сварочную ванну каждой капли электродного металла. Это ограничивает наши представления о механизмах тепломассопереноса, требует разработки и реализации новых экспериментальных комплексов. Отмеченное обстоятельство свидетельствует об актуальности проводимых исследований, результаты которых позволят получить новый высокоэффективный инструмент в изучении сложных процессов тепломассопереноса, сопровождающих формирование неразъемных соединений.

Целью работы являлось изучение особенностей быстропротекающих процессов теплопереноса при формировании неразъемных соединений методами дуговой сварки плавящимся электродом с подсветкой дугового промежутка лучом лазера для дополнения современных представлений о наиболее эффективных методах повышения стабильности и эффективности существующих технологий.

Методика и техника экспериментальных исследований. В качестве примера реализации направления, при котором можно обеспечить достижение выше сформулированной цели, может быть исследовательский комплекс, представленный на рис. 1.

Регистрация параметров технологического процесса осуществляется следующим образом. С помощью специального программного обеспечения (ПО) задается алгоритм выполнения сварного соединения (или наплавки), задание передается с персонального компьютера (ПК) на контроллер. Контроллер управляет перемещением стола с образцом и запускает процесс сварки. После задержки 1-2 с с момента начала сварки контроллер подает сигнал (Trigger) начала записи на высокоскоростную видеокамеру и плату сбора данных, записывающую энергетические параметры (ток, напряжение). Каждый кадр высокоскоростной видеозаписи синхронизируется с импульсами лазера посредством блока синхронизации [8–10]. Импульсы синхронизации также обеспечивают постановку меток на осциллограммах тока и напряжения для точного совмещения осциллограмм с кадрами видеозаписи [11]. Остановка записи производится по сигналу от контроллера.

Комплекс подразумевает использование инфракрасной тепловизионной камеры для записи тепловых полей в процессе сварки (наплавки). Расшифровка термограмм позволяет получить информацию о кинетике распространения тепла, скорости остывания сварочной ванны и зоны термического влияния, размерах сварочной ванны и ЗТВ, изменении их температуры во времени [12, 13].

Роботизированная сварочная платформа. Возможность получения повторяемых результатов при проведении исследований в области дуговой сварки в среде защитных газов в большей степени определяется человеческим фактором. Следовательно, стабильность и точность поддержания основных параметров режима сварки напрямую зависят от навыков сварщика. Кроме того, при выполнении скоростной видеосъемки процесса сварки существует дополнительная проблема по ее синхронизации с моментом появления изучаемого объекта в фокусе видеокамеры.

Решением проблемы повторяемости результатов экспериментов является полная автоматизация процесса сварки при проведении исследований. В настоящее время в промышленности для автоматизации процессов дуговой сварки широко применяют различные механизмы, например, шестиосевые роботизированные манипуляторы. Однако применение готовых решений невозможно из-за принципиальных недостатков, а именно: всегда производится перемещение сварочной горелки, что затрудняет скоростную видеосъемку. Кроме того, такие манипуляторы отличаются избыточными возможностями, что усложняет их обслуживание.

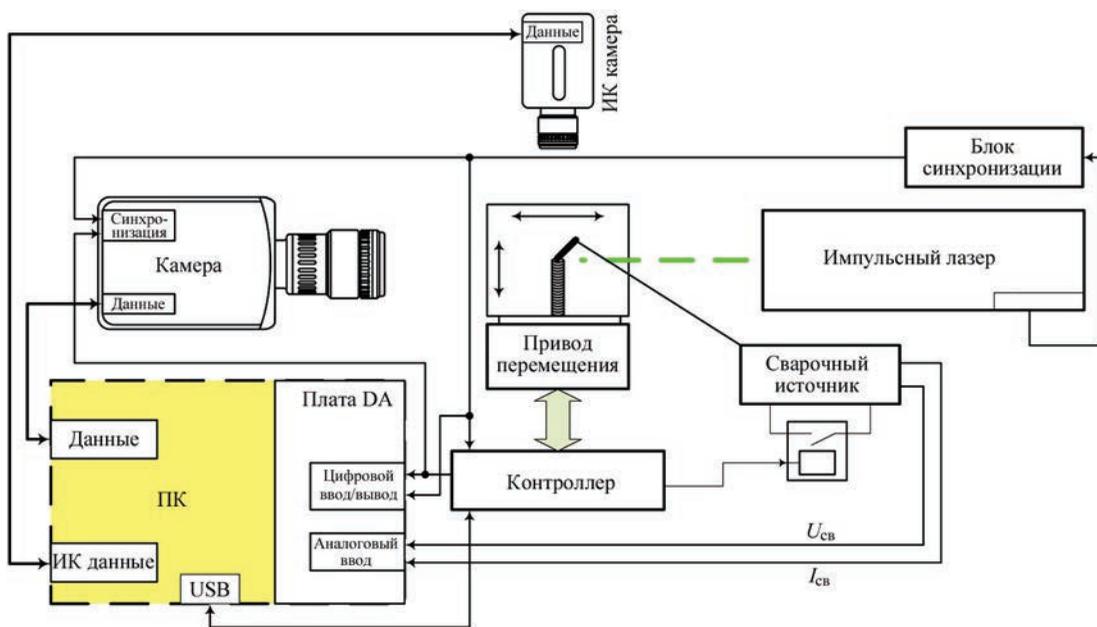


Рис. 1. Комплекс для регистрации и исследования быстропротекающих процессов теплопереноса при дуговой сварке плавящимся электродом

Важным звеном в разработанном комплексе является роботизированная сварочная платформа, которая обеспечивает в процессе исследований автоматическое перемещение свариваемого образца по одной из выбираемых траекторий перемещения с целью обеспечения требуемой геометрии сварного шва в соответствии с требованиями ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы определения механических свойств». Реализация способа перемещения образца с использованием платформы роботизированного типа связана с необходимостью получения повторяемых результатов при проведении исследований, особенно в области механизированной дуговой сварки в среде защитных газов. Для исключения человеческого фактора и решения проблемы повторяемости результатов экспериментов в представляемом комплексе обеспечивается полная автоматизация процесса сварки при проведении исследований.

Учитывая изложенное выше, был разработан и изготовлен действующий образец роботизированной платформы для выполнения дуговой сварки и наплавки опытных образцов при проведении экспериментальных исследований. При проектировании платформы руководствовались соображениями о соответствии ее основных технических характеристик параметрам типовых контрольных сварных соединений, а именно, размерам и массе реальных образцов. Так как в большинстве случаев при поведении экспериментов сварку или наплавку осуществляют в нижнем положении, и нет необходимости изменять длину межэлектродного промежутка, то для перемещения образцов достаточно двух осей. Точность перемещения горелки при полуавтоматической сварке в среде защитных газов не превышает 1 мм, поэтому дискретность и точность позиционирования образцов являются достаточными. Габаритные размеры платформы выбраны такими, чтобы была возможность ее установки в стандартную 19-дюймовую стойку глубиной 800 мм.

Основные технические характеристики платформы

Количество осей перемещения, шт.	2
Максимальный размер свариваемых образцов (Ш×Г×В), мм	200×300×20
Грузоподъемность, кг	20
Дискретность перемещения образцов, мм	0,1
Точность позиционирования образцов, мм	±0,1
Диапазон задания скорости перемещения образцов, мм/мин.....	0...5000
Габаритные размеры платформы (Ш×Г×В), мм	505×740×350
Масса платформы, кг	40

Кинематическая схема платформы выбрана Н-ВОТ (рис. 2) как наиболее оптимальная и надежная для заданных технических характеристик.

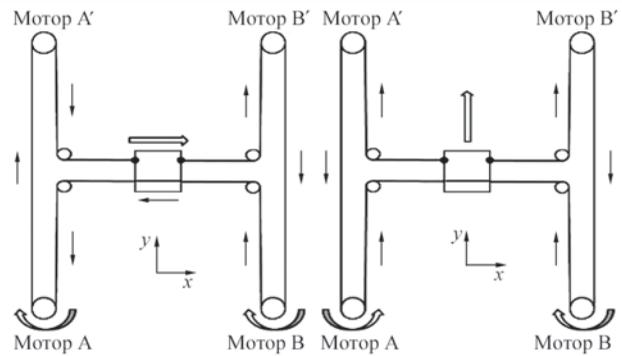


Рис. 2. Кинематическая схема роботизированной платформы

Для повышения точности, жесткости и грузоподъемности платформы площадка крепления образцов перемещается на линейных подшипниках по цилиндрическим направляющим диаметром 20 мм с помощью армированного зубчатого ремня шириной 25 мм. В качестве привода применены шаговые электромоторы типоразмера NEMA 34, которые для повышения плавности перемещения работают в микрошаговом режиме. Защита платформы от выхода за пределы осей перемещения реализована с помощью индуктивных конечных датчиков, которые также используются для ее установки в «нулевое» исходное положение.

Функциональная схема роботизированной платформы представлена на рис. 3. Назначение большинства блоков описано выше, за исключением блока числового программного управления, который предназначен для преобразования команд управляющего компьютера экспериментальной установки в соответствующие сигналы управления шаговыми моторами. В качестве команд используются стандартные G-коды, подробно описанные в ГОСТ 20999-83 «Устройства числового программного управления для металлообрабатывающего оборудования. Кодирование информации управляющих программ», что значительно упрощает программирование траектории перемещения платформы (рис. 4). Включение и выключение сварочного источника питания осуществляется с помощью «сухого» контакта, что позволяет в большинстве случаев подключать его к экспериментальной установке без дополнительных согласующих устройств.

Обработка результатов исследований. Процесс обработки состоит из трех этапов: определение средних значений тока, напряжения, мощности и погонной энергии в заданном интервале времени; статистическая обработка параметров коротких замыканий (КЗ) в процессе сварки (наплавки), т. е. получение информации о количестве КЗ в единицу времени, средней длительности КЗ, среднем значении тока КЗ, коэффициенте вариации длительности КЗ; построение сравнительных

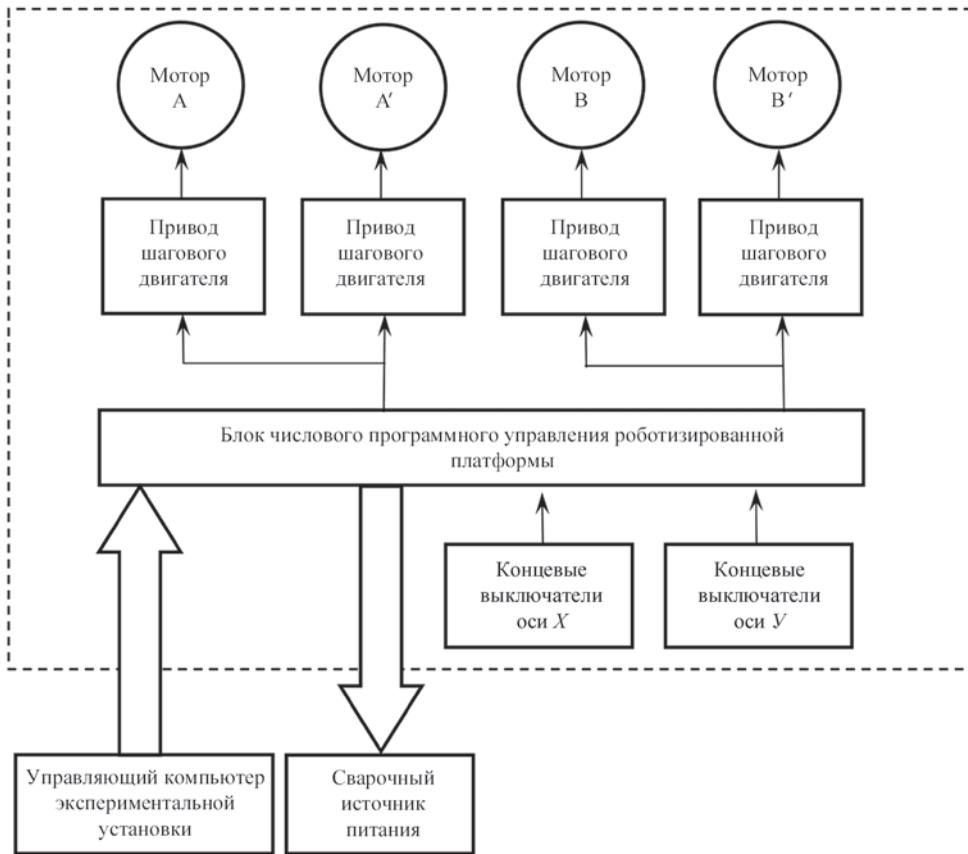


Рис. 3. Функциональная схема роботизированной платформы

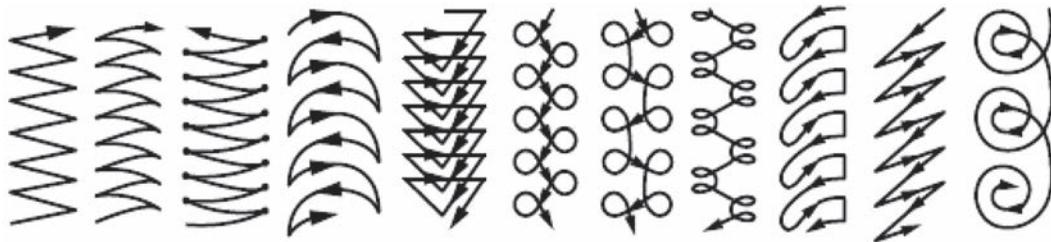
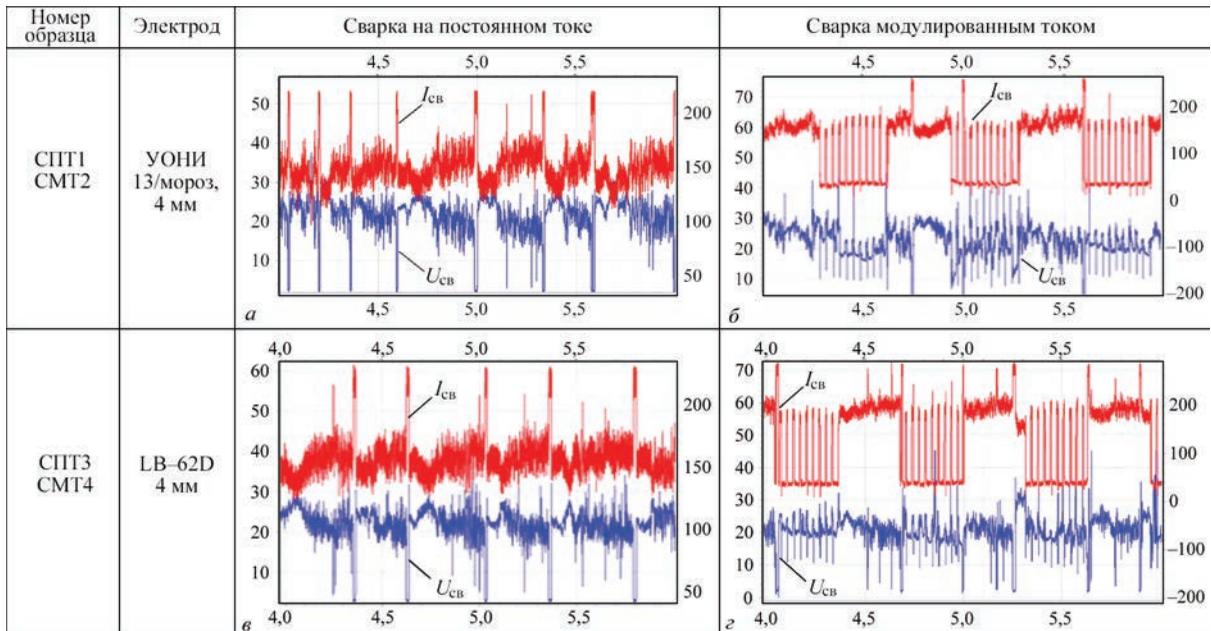


Рис. 4. Варианты траекторий перемещения платформы

Осциллограммы тока в сварочной цепи и напряжения на межэлектродном промежутке



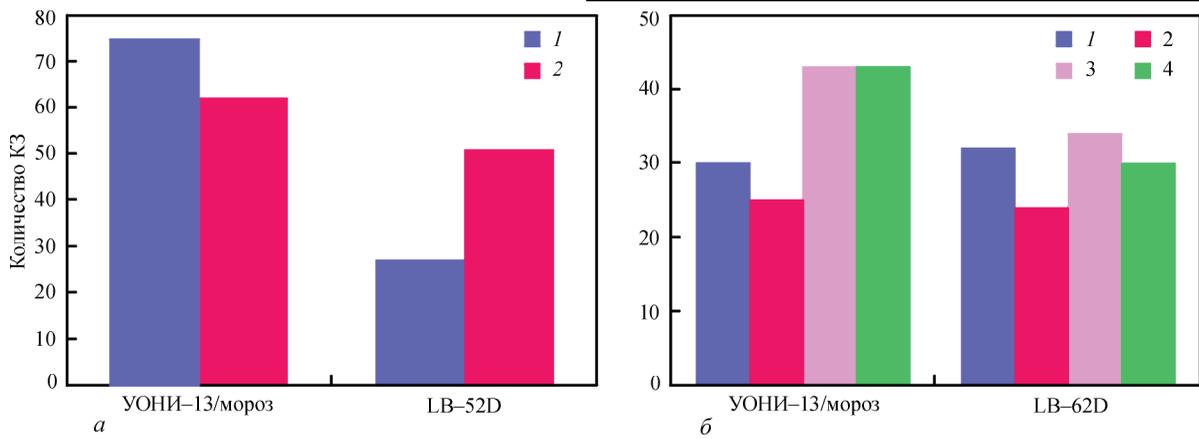


Рис. 5. Количество КЗ за 10 с: *а* — сварка корневого шва (КШ), электродами диаметром 3 мм (1 — корень, постоянный ток; 2 — корень, модулированный ток); *б* — сварка заполняющего шва (ЗШ) и облицовочного шва (ОШ) электродами диаметром 4 мм (1 — заполнение, постоянный ток; 2 — заполнение, модулированный ток; 3 — облицовка, постоянный ток; 4 — облицовка, модулированный ток)

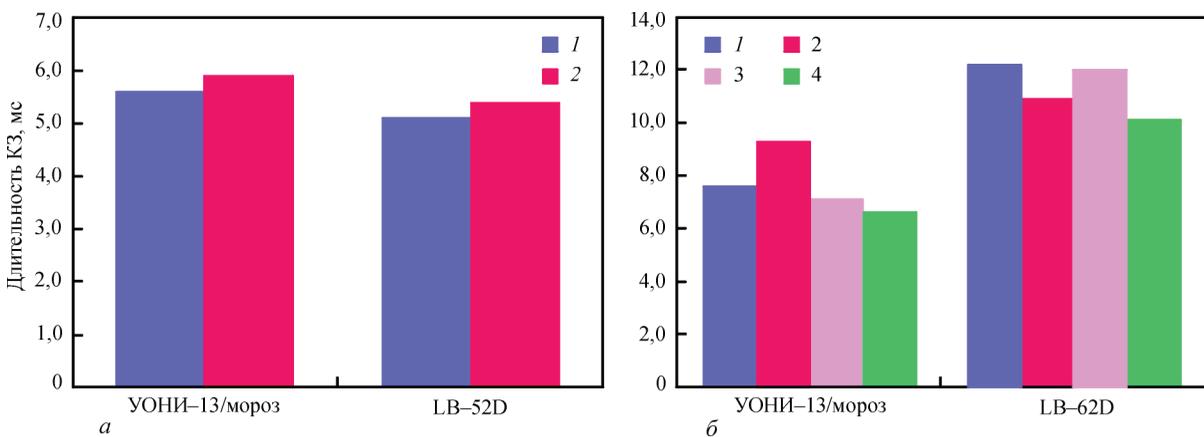


Рис. 6. Длительность КЗ: *а* — сварка КШ электродами диаметром 3 мм; *б* — сварка ЗШ и ОШ электродами диаметром 4 мм (обозначения те же, что и на рис. 5)

диаграмм полученных параметров от режимов сварки, типов электродов и т. п.

В таблице приведены характерные осциллограммы тока и напряжения дуги, записанные в процессе сварки, где СПТ — сварка на постоянном токе, СМТ — сварка в режиме низкочастотной модуляции сварочного тока, 1, 3 — сварка корневых швов, 2, 4 — сварка заполняющих слоев.

На рис. 5–8 приведены столбчатые диаграммы, построенные в результате обработки экспериментально полученных осциллограмм основных энергетических параметров режимов сварки. Анализ приведенных диаграмм позволяет дать количественную оценку показателей тепломассопереноса ручной дуговой сварки покрытыми электродами, которые совместно с анализом экспериментально полученных тепловизионных по-

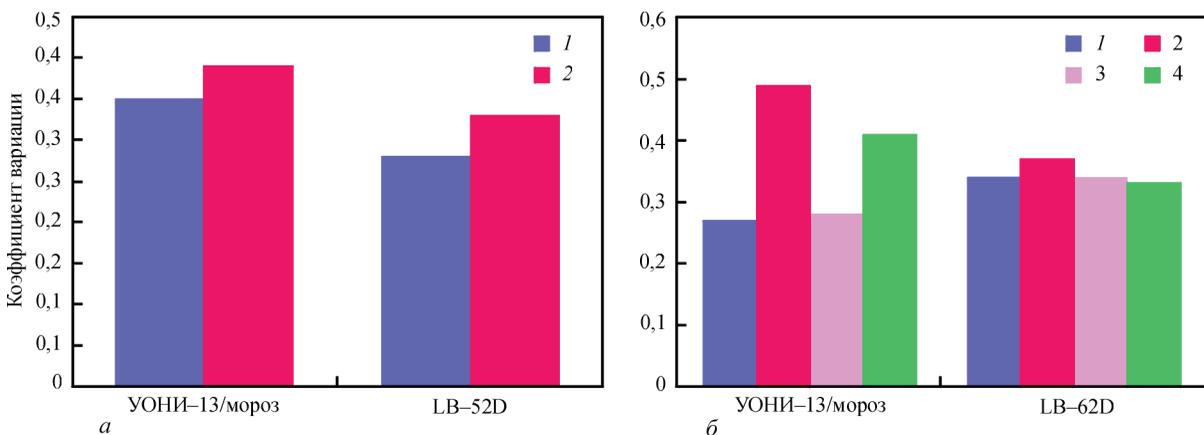


Рис. 7. Коэффициент вариации длительности КЗ: *а* — сварка КШ, электродами диаметром 3 мм, *б* — сварка ЗШ и ОШ электродами диаметром 4 мм (обозначения те же, что и на рис. 5)

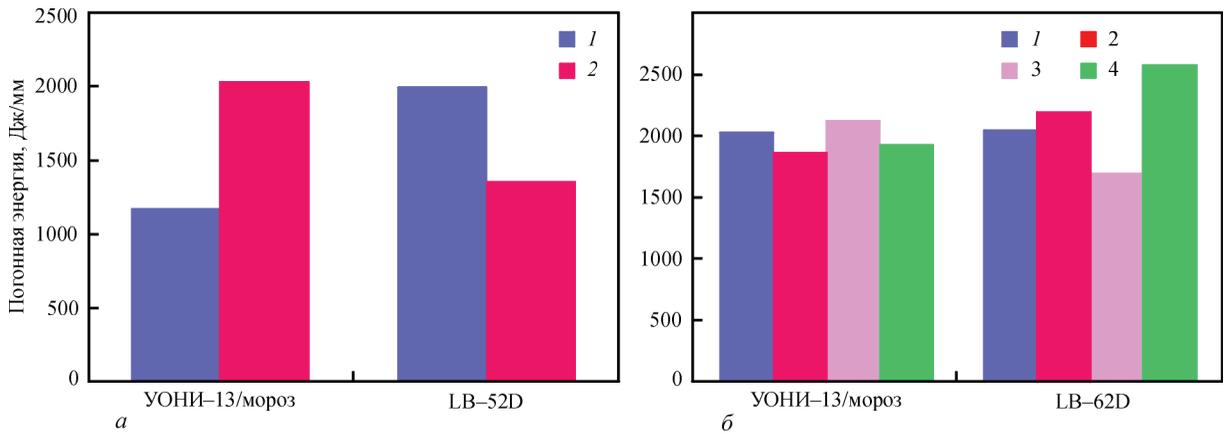


Рис. 8. Погонная энергия, затраченная при сварке: а — сварка КШ, электродами диаметром 3 мм; б — сварка ЗШ и ОШ электродами диаметром 4 мм (обозначения те же, что и на рис. 5)



Рис. 9. Тепловизионная съемка температурных полей на поверхности пластины при сварке в нижнем положении

лей позволяют в полной мере оценить характеристики теплопереноса.

На рис. 9 приведены фрагменты проведения тепловизионной съемки.

Результаты тепловизионной съемки, полученные с применением специальной программы об-

работки исследовательского комплекса, можно представить в виде тепловизионных картин, которые представлены на рис. 10. Экспериментально полученные тепловые поля помогают установить длину сварочной ванны, а, следовательно, и ско-

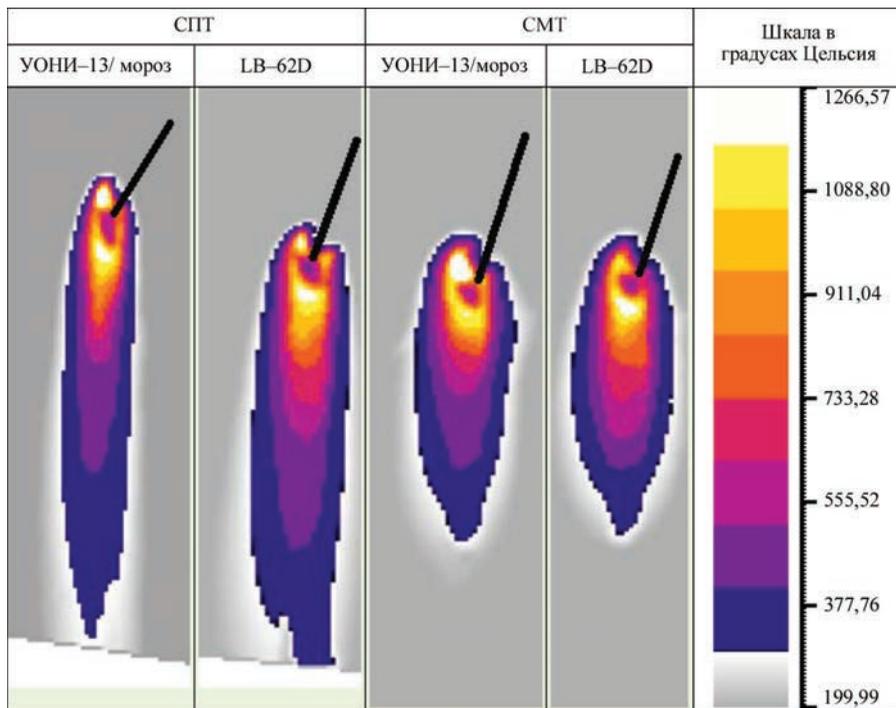


Рис. 10. Распределение температурных полей при СПТ и СМТ электродами диаметром 4 мм

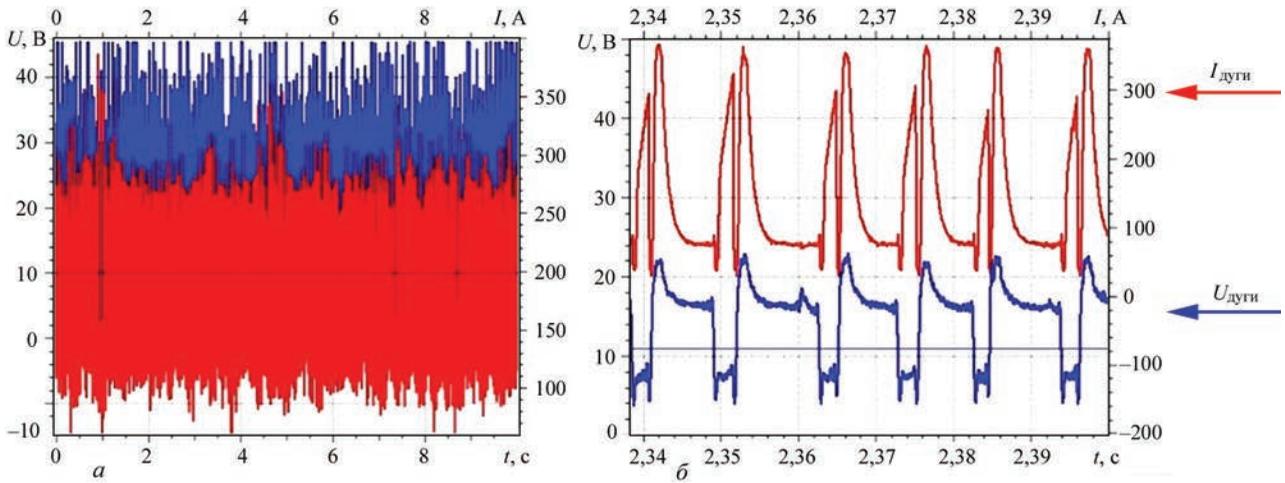


Рис. 11. Пример обработки результатов измерения тока и напряжения дуги в процессе экспериментальных исследований: *а* — без фильтрации фоновых помех; *б* — после фильтрации при выводе результатов для анализа

рость кристаллизационных процессов в формируемом сварном соединении.

При механизированных способах сварки частота перехода расплавленного электродного металла в сварочную ванну составляет 25...300 капель в секунду, что делает весьма затруднительным изучение быстропротекающих процессов как на этапе плавления, так и на этапе их перехода в сварочную ванну.

Для обработки результатов экспериментов по изучению характеристик тепломассопереноса при механизированных способах сварки, в составе комплекса применено специальное программное обеспечение, позволяющее представлять, также как и при ручной дуговой сварке, их в виде графических изображений и численных значений характеристик тепломассопереноса: погонной энергии, частоты переноса капель электродного металла,

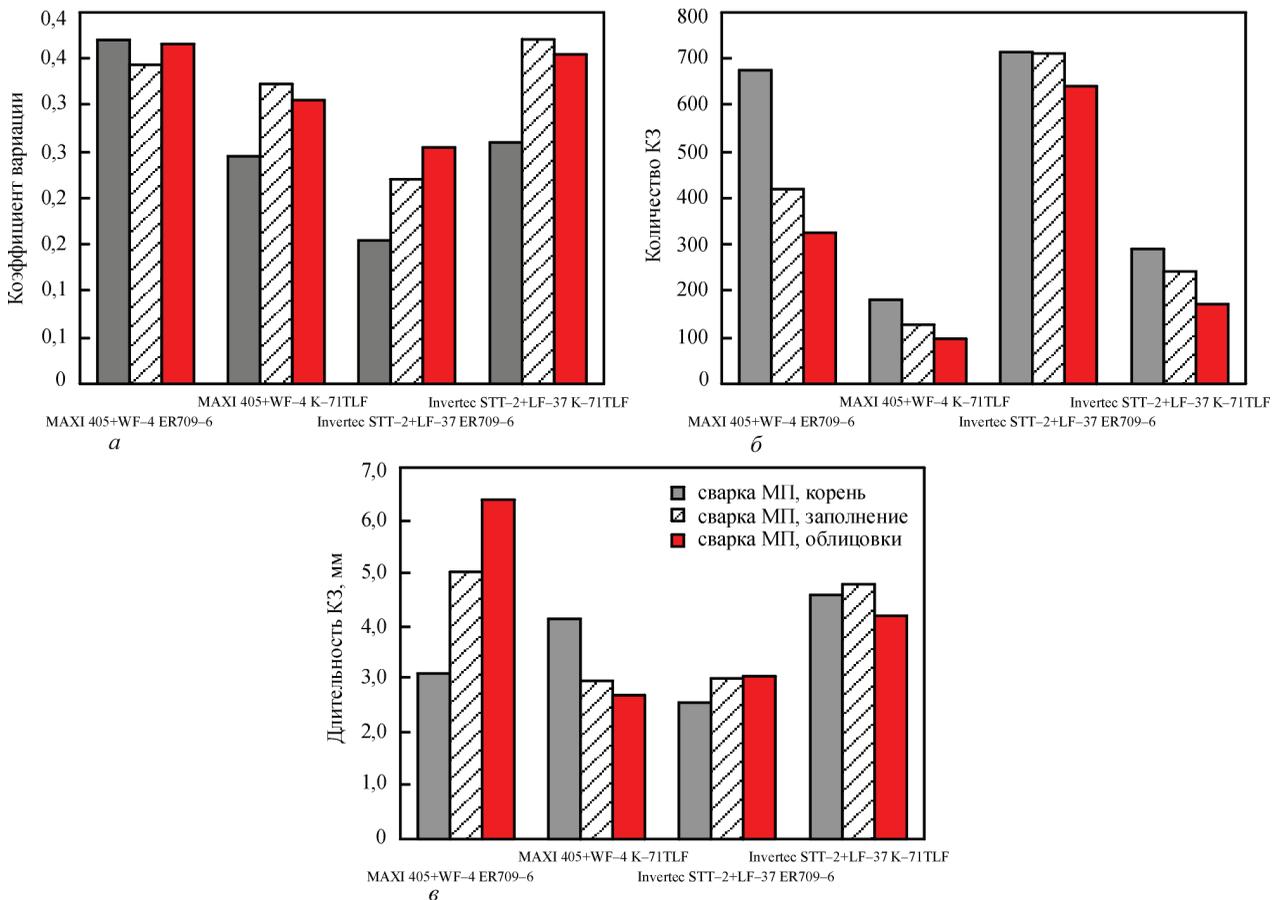


Рис. 12. Примеры столбчатых диаграмм для механизированной сварки в среде углекислого газа с КЗ дугового промежутка: *а* — коэффициент вариации длительности (сварка МП); *б* — количество КЗ (сварка МП); *в* — средняя длительность КЗ (сварка МП)

коэффициентов вариации частоты, длительности, амплитуды тока КЗ, изотерм тепловых полей и графиков изменения термических циклов сварки.

Визуализация результатов измерений и их обработка всецело зависит от способов регистрации параметров, которые определяют способность системы измерений обеспечить подавление высокочастотных помех посредством удаления из спектров осциллограмм напряжения и тока высокочастотных составляющих, имеющих большую амплитуду, определение порогового значения напряжения при КЗ (данная задача возлагается на исследователя и выполняется посредством ручного задания порога маркерной линией на осциллограмме напряжения), рис. 11. После этого производится: автоматическая выборка КЗ в требуемом интервале времени, определение тока и длительности каждого КЗ и выполняется вычисление среднего значения тока КЗ в полученной выборке, средней длительности КЗ и коэффициент вариации длительности КЗ. Полученные данные могут быть представлены в виде таблиц, а также столбчатых диаграмм (рис. 12).

Средние значения вычисляются посредством численного интегрирования тока, напряжения и их

произведения (мощности). Скорость сварки, позволяющая рассчитать погонную энергию, вычисляется как отношение длины сварного шва (наплавляемого покрытия) ко времени, затраченному на производство этого шва (покрытия). Кроме того, в состав комплекса входит модуль высокоскоростной видеорегистрации процесса плавления и переноса электродного металла, а также модуль осциллографирования основных энергетических параметров процесса сварки, осуществляемого синхронно с регистрацией плавления и переноса каждой капли электродного металла. С целью повышения качества видеосъемки процесса плавления и переноса электродного металла используется импульсная лазерная подсветка.

Однако до настоящего времени остаются малоизученными процессы тепломассопереноса, протекающие в сложной электродинамической системе источник питания – дуга – сварочная ванна – изделие при различных способах сварки, в том числе с импульсным изменением энергетических параметров режима. При изучении данных явлений возникает ряд сложностей, связанных со скоростью протекания процессов тепломассопереноса при одновременном действии мощного светового излучения сварочной дуги (рис. 13).

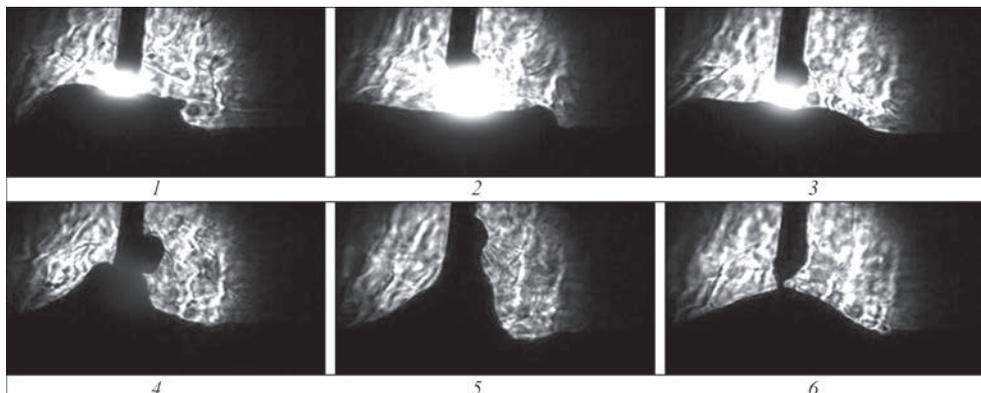


Рис. 13. Видеокадры процесса плавления и переноса электродного металла при механизированной сварке в среде углекислого газа проволокой сплошного сечения, частота видеосъемки 5000 кадров в секунду (подсветка дугового промежутка прожектором на ксеноновой лампе)

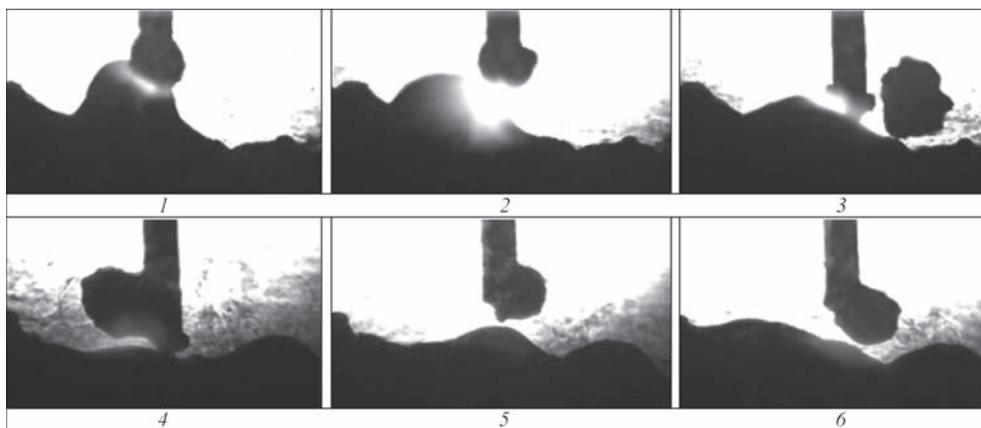


Рис. 14. Видеокадры процесса плавления и переноса электродного металла при механизированной сварке в среде углекислого газа проволокой сплошного сечения, частота видеосъемки 5000 кадров в секунду (подсветка дугового промежутка лучом Cu-Br-лазера)

На рис. 13 и 14 приведены видеок кадры сварочного микроцикла (период плавления и переноса одной капли электродного металла. Сравнение видеок кадров подтверждает предварительно сделанное предположение о том, что применение при съемке лазерного когерентного излучения должно способствовать лучшей визуализации изучаемого объекта тепломассопереноса. Выполненные эксперименты полностью подтвердили правильность выбранного направления разработки исследовательского комплекса.

В заключение можно отметить, что исследовательский комплекс роботизированного типа, предназначенный для изучения особенностей быстропротекающих процессов тепломассопереноса при формировании неразъемных соединений методами дуговой сварки плавящимся электродом в условиях подсветки дугового промежутка лучом Cu–Vr-лазера имеет требуемые технические характеристики и может быть эффективно применен для изготовления опытных образцов при проведении экспериментальных исследований, связанных с изысканием путей повышения надежности конструкций ответственного назначения, работающих в экстремальных условиях.

Проведенные испытания исследовательского комплекса полностью подтвердили его высокую эффективность при изучении быстропротекающих процессов тепломассопереноса при электродуговой сварке плавящимся электродом, что безусловно расширяет границы современных представлений о наиболее эффективных методах повышения стабильности и эффективности существующих технологий.

*Работа выполнена за счет средств РНФ по проекту № 16-19-10010 в 2016–2018 гг.

Список литературы

1. Кархин В. А. (2015) *Тепловые процессы при сварке*. 2-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета.
2. Патон Б. Е., Максимов С. Ю., Сидорук В. С., Сараев Ю. Н. (2014) К вопросу о саморегулировании дуги при сварке плавящимся электродом. *Сварочное производство*, **12**, 3–11.
3. Saraev Y. N., Bezborodov V. P., Gladkovsky S. V., Golikov N. I. (2016) The ways of reliability enhancement of welded metal structures for critical applications in the conditions of low climatic temperatures. *Citation: AIP Conference Proceedings*, 1783, 020195.
4. Saraev Y. N. (2011) Adaptive pulse technological processes of welding and pad weld is a new high-performance method of obtaining of permanent joints of high-strength steels. *Special issue of World J. Engineering*, **8**, 989.
5. Сараев Ю. Н. (2002) Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов. *Сварочное производство*, **1**, 4–7.
6. Сараев Ю. Н. (2010) Обоснование концепции повышения безопасности и живучести технических систем, эксплуатируемых в регионах Сибири и Крайнего Севера, на

основе применения адаптивных импульсных технологий сварки. *Тяжелое машиностроение*, **8**, 14–19.

7. Сараев Ю. Н., Безбородов В. П., Gladkovskiy S. V., Golikov N. A. (2016) Исследование свойств сварных соединений марганцовистой стали, полученных низкочастотной импульсно-дуговой сваркой. *Деформация и разрушение*, **1**, 36–41.
8. Сараев Ю. Н. (1988) Управление переносом электродного металла при сварке в CO₂ с короткими замыканиями дугового промежутка (Обзор). *Автоматическая сварка*, **12**, 16–23.
9. Yermachenko V. M., Kuznetsov A. P., Petrovskiy V. N. et al. (2011) Specific features of the welding of metals by radiation of high-power fiber laser. *Laser Physics*, **21**(8), 1530–1537.
10. Димаки В. А., Суханов В. Б., Троицкий В. О., Филонов А. Г. (2012) Стабилизированный лазер на бромиде меди с автоматизированным управлением режимами работы со средней мощностью генерации 20 Вт. *Приборы и техника эксперимента*, **6**, 95–99.
11. Сараев Ю. Н. (2017) Поискные исследования повышения надежности металлоконструкций ответственного назначения, работающих в условиях экстремальных нагрузок и низких климатических температур. *Научные технологии в проектах РНФ*. Сибирь. Псахье С. Г. и Шаркеев Ю. П. (ред.). Томск, НТЛ. ISBN 978-5-89503-607-5, сс. 134–202.
12. Сараев Ю. Н., Лунев А. Г., Киселев А. С. и др. (2018) Исследование влияния энергетических параметров режима дуговой сварки покрытыми электродами на стабильность тепломассопереноса. *Сварочное производство*, **2**, 3–13.ц
13. Дилтай У., Штайн Л., Весте К., Райх Ф. (2003) Состояние и перспективы применения высокоэффективных сварочных технологий. *Автоматическая сварка*, **10–11**, 151–157.

References

1. Karkhin, V.A. (2015) *Thermal processes in welding*. 2nd Ed. St.-Petersburg, Izd-vo Politekhn. Un-ta [in Russian].
2. Paton, B.E., Maksimov, S.Yu., Sidoruk, V.S., Saraev, Yu.N. (2014) To problem of arc self-regulation in consumable electrode welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **12**, 3-11 [in Russian].
3. Saraev, Y.N., Bezborodov, V.P., Gladkovsky, S.V., Golikov, N.I. (2016) The ways of reliability enhancement of welded metal structures for critical applications in the conditions of low climatic temperatures. *AIP Conf. Proc.*, 1783, 020195.
4. Saraev, Y.N. (2011) Adaptive pulse technological processes of welding and pad weld is a new high-performance method of obtaining of permanent joints of high-strength steels. *World J. Engineering, Special Issue*, **8**, 989.
5. Saraev, Yu.N. (2002) Adaptive pulsed-arc mechanized welding methods in construction of main pipelines. *Svarochn. Proizvodstvo, Svarochn. Proizvodstvo*, **1**, 4-7 [in Russian].
6. Saraev, Yu.N. (2010) Substantiation of concept of safety improvement and survivability of technical systems operated in the regions of Siberia and Extreme North, based on application of pulsed welding technologies. *Tyazholoe Mashinostroenie*, **8**, 14-19 [in Russian].
7. Saraev, Yu.N., Bezborodov, V.P., Gladkovsky, S.V., Golikov, N.A. (2016) Study of properties of manganese steel welded joints produced by low-frequency pulsed arc welding. *Deformatsiya i Razrushenie*, **1**, 36-41 [in Russian].
8. Saraev, Yu.N. (1988) Control of electrode metal transfer in CO₂-welding with short circuit of arc gap (Review). *Avtomatich. Svarka*, **12**, 16-23 [in Russian].
9. Yermachenko, V.M., Kuznetsov, A.P., Petrovskiy, V.N. et al. (2011) Specific features of the welding of metals by radiation of high-power fiber laser. *Laser Physics*, **21**(8), 1530-1537.
10. Dimaki, V.A., Sukhanov, V.B., Troitskiy, V.O., Filonov, A.G. (2012) Stabilized laser on copper bromide with automated operation modes having average generation power of 20 W. *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*, **6**, 95-99 [in Russian].
11. Saraev, Yu.N. (2017) Exploratory research of reliability improvement of critical metal structures, operated under

- extreme load conditions and low climatic temperatures. In: High technologies in the projects of RSF. Siberia. Ed. by S.G. Psakhie et al. Tomsk, Izd-vo NTL, 134-202 [in Russian].
12. Saraev, Yu.N., Lunev, A.G., Kiselev, A.S. et al. (2018) Investigation of effect of energy parameters of consumable electrode arc welding on stability of heat- and mass transfer. *Svarochn. Proizvodstvo*, 2, 3-13 [in Russian].
13. Dilthey, U., Stein, L., Woeste, K., Reich, F. (2003) Latest developments and trends in high-efficient welding technologies. *The Paton Welding J.*, 10-11, 146-152.

КОМПЛЕКС ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Ю. М. САРАЄВ¹, А. Г. ЛУНЬОВ¹, А. С. КІСЕЛЬОВ², А. С. ГОРДИНЕЦЬ², М. В. ТРИГУБ³

¹Інститут фізики міцності і матеріалознавства СВ РАН.

634055, м. Томськ, просп. Академічний, 2/4. E-mail: litsin@ispms.tsc.ru

²Національний дослідний Томський політехнічний інститут. 634004, м. Томськ, просп. Леніна. 30. E-mail: kas@tpu.ru

³Інститут оптики атмосфери ім. В. Е. Зуєва СВ РАН. 634055, м. Томськ, площа акад. Зуєва, 1. E-mail: trigub@tpu.ru

В роботі представлені результати розробки і виготовлення унікального дослідницького комплексу для вивчення швидкоплинних процесів тепломасопереносу при дуговому зварюванні електродом, що плавиться. Показано переваги розробленого комплексу перед традиційно застосовуваними з використанням кіно- та відеокамер з тінювим принципом реєстрації характеристик тепломасопереносу. Досліджували бистроплинні процеси із застосуванням високошвидкісної відеозйомки з підсвічуванням дугового проміжку променем Cu–Br-лазера, що поліпшує візуалізацію досліджуваного об'єкта – процесу плавлення і перенесення кожної краплі електродного металу в умовах інтенсивного світлового випромінювання від електричної дуги. У статті наведено схеми, алгоритми управління, відеокадри окремого зварювально-го мікроцикла, приклади запису осцилограм і графічні уявлення змін їх кількісних значень. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 14.

Ключові слова: зварювання, наплавлення, відеозйомка, плавлення, тепломасоперенос, лазер, управління, стабільність, електрична дуга, зварювання плавким електродом

COMPLEX FOR INVESTIGATION OF ARC WELDING PROCESSES

Yu.N. SARAEV¹, A.G. LUNEV¹, A.S. KISELEV², A.S. GORDYNETS², M.V. TRIGUB³

¹Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS, 2/4 Akademicheskaya Ave., 634055, Tomsk, Russia.

E-mail: litsin@ispms.tsc.ru

²National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave., 634004, Tomsk, E-mail: kas@tpu.ru

³V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of SB RAS 1, Acad. Zuev sq., 634055 Tomsk, Russia. Email: trigub@tpu.ru

The work presents the results of development and manufacture of a unique research complex for investigation of fast processes of heat-mass transfer in consumable electrode arc welding. Advantages of the developed complex over the traditionally applied ones using film and video cameras with shadow principle of registration of heat and mass transfer characteristics are shown. Fast processes were studied with application of high-speed video recording with illumination of the arc gap by Cu-Br laser beam, improving visualization of the studied object — the process of melting and transfer of each drop of molten metal under the conditions of intensive light of the electric arc. The paper contains explanatory diagrams, control algorithms, video frames of a separate welding microcycle, examples of oscillogram recording and graphical representations of changes in their quantitative values. 13 Ref., 1 Tabl., 14 Fig.

Keywords: welding, surfacing, video filming, melting, heat-mass transfer, laser, control, stability, electric arc, consumable electrode welding

Поступила в редакцию 27.06.2018



Подписку на журнал

«Автоматическая сварка» (подписной индекс 70031)

можно оформить через редакцию журнала с любого месяца и на любой срок, включая выпуски журналов прошлых лет.

Тел./факс: (38044) 200-82-77