



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНО-МИКРОПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ*

В. В. КИРИЧЕНКО, канд. техн. наук, **Н. А. ГРЯЗНОВ**, канд. физ.-мат. наук
(ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, С.-Петербург, РФ),
чл.-кор. НАН Украины **И. В. КРИВЦУН** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Создан экспериментальный комплекс для изучения процессов импульсной гибридной (лазерно-микроплазменной) сварки и обработки материалов с использованием излучения импульсно-периодического Nd:YAG-лазера с широким диапазоном регулирования параметров импульса и импульсной малоамперной дуги, объединяемых при помощи интегрированного плазмотрона. Предложенные алгоритмы пространственной и временной синхронизации двух импульсных источников энергии для комбинированного воздействия на материалы дают возможность исследовать процессы лазерно-микроплазменной сварки стали для автомобилестроения, обработки алюминиевых сплавов и спекания наноматериалов.

Ключевые слова: гибридная сварка, микроплазменная дуга, лазерное излучение, импульс, экспериментальный комплекс, ток дуги, форма проплавления

Производственные возможности современной промышленности в значительной степени зависят от развития технологий обработки материалов. Трудно переоценить важность создания и развития процессов сварки, резки и различных способов поверхностной обработки, основанных на применении дугового разряда как самого дешевого и доступного источника тепловой энергии. В настоящее время совершенствование дуговых и плазменных технологий требует высокой концентрации энергии в электродуговой плазме и стабилизации разряда при одновременном увеличении производительности технологического процесса. Альтернативный путь, широко применяемый в промышленности, основан на использовании лазерного излучения как единственного теплового источника, так и совместно с другими традиционными источниками термического воздействия, включая дуговой разряд, ВЧ электромагнитные поля или световое излучение. Благодаря высокой концентрации энергии в фокусе пучка и хорошей управляемости лазер способен обеспечить глубокое проплавление металла, точность и стабильность при формировании сварного шва или реза.

Несмотря на очевидные преимущества, возможности лазера как теплового источника для некоторых областей применения значительно ограничены. Прежде всего это происходит из-за низ-

кой эффективности нагрева металлов лазерным излучением, связанной с высокой отражательной способностью металлической поверхности при длинах волн, типичных для большинства технологических лазеров. Другой фактор, снижающий эффективность применения лазеров, связан с появлением плазмы лазерного факела над рабочей поверхностью, которая поглощает излучение и тем самым уменьшает энергию, вкладываемую в зону обработки.

Один из подходов к решению упомянутых проблем базируется на использовании гибридных лазерно-дуговых и лазерно-плазменных процессов, сущность которых состоит в совместном воздействии на обрабатываемый объект лазерным излучением и электрической, в том числе сжатой (плазменной) дугой [1–5]. При практической реализации таких процессов оба тепловых источника действуют на металлическую поверхность в общей зоне обработки. Нагрев металла электрической дугой приводит к повышению его температуры и в результате к увеличению доли поглощаемой энергии лазерного излучения. В свою очередь, компактное фокальное пятно лазерного пучка создает над металлической поверхностью ограниченную зону с увеличенной концентрацией свободных электронов, которая приводит к повышению плотности тока в дуговом разряде и локализации его энерговклада. Другими словами, применение двух источников различной физической природы способно привести к возникновению положительного синергетического эффекта, который проявляется в повышении эффективности теплового воздействия как лазерного излучения, так и дуговой плазмы [6, 7].

* По материалам международной конференции «Laser technologies in welding and materials processing», 29 May–1 June, 2007, vil. Katsiveli, Crimea, Ukraine.

С целью изучения процессов импульсной лазерно-микроплазменной обработки материалов ЦНИИ робототехники и технической кибернетики совместно с ИЭС им. Е. О. Патона был разработан и изготовлен экспериментальный комплекс, включающий импульсно-периодический Nd:YAG-лазер с управляемой формой импульса, источник питания импульсной микроплазменной дуги и специальный плазмотрон прямого действия, который обеспечивает коаксиальное совмещение лазерного пучка и дуги. Комплекс был создан для решения следующих задач:

- оценки потенциального синергетического эффекта двух источников импульсного теплового воздействия на металлы при изменении времени задержки между импульсами лазерного излучения и тока дуги;
- предварительных исследований влияния пространственных и временных параметров лазерного излучения, а также точности совмещения зон воздействия на эффективность обработки;
- выработки технических требований к импульсному гибриднему тепловому источнику;
- разработки функциональной схемы и структуры оборудования для импульсной лазерно-микроплазменной сварки и обработки материалов;
- прикладных технологических исследований гибридной сварки для уточнения функциональной структуры и параметров комплекса оборудования;
- формирования технических требований к подсистемам комплекса;
- исследования технологических возможностей оборудования для импульсной гибридной сварки и обработки материалов;
- практического применения импульсных гибридных процессов и разработанного оборудования.

Априори целесообразность работ вызвана тем, что совместное воздействие на металлы двух различных импульсных источников тепла малой и средней мощности может привести к увеличению эффективности использования энергии как лазерного, так и дугового источников; максимальная глубина проплавления, определяющая толщину свариваемого металла при гибридной сварке, может быть более чем в полтора раза выше по сравнению с микроплазменной сваркой при практически удвоенной производительности процесса.

Создание маломощного технологического оборудования для импульсной лазерно-микроплазменной обработки материалов обеспечивает широкие возможности варьирования параметров процесса для формирования заданных свойств сварных соединений.

Технические параметры и схема экспериментального комплекса. В качестве лазерной составляющей комплекса оборудования для импульсной гибридной сварки и обработки матери-

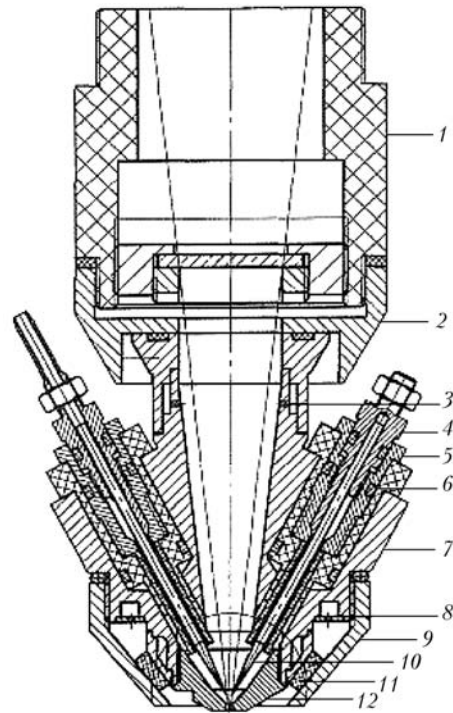


Рис. 1. Схема интегрированного плазмотрона: 1 — фокусирующая система; 2 — стыковочно-юстировочный узел; 3 — отверстия для ввода плазмообразующего газа; 4 — цапга; 5 — корпус катодного узла; 6 — изолятор; 7 — корпус плазмотрона; 8 — рассекатель газа; 9 — сопло для подачи защитного газа; 10 — термокатод; 11 — пористая набивка; 12 — плазмоформирующее сопло

алов была выбрана технологическая лазерная установка, предназначенная для резки металлов и глубокой гравировки. Основные параметры лазерного излучателя следующие: тип лазера Nd:YAG; импульсный режим работы; программируемая форма импульса; рабочая частота ≤ 100 Гц; средняя мощность 120 Вт; энергия в импульсе (при средней мощности 120 Вт) — до 3 Дж.

В качестве устройства, обеспечивающего совмещение сфокусированного лазерного пучка и малоамперной сжатой дуги, использовали интегрированный плазмотрон прямого действия, разработанный в ИЭС им. Е.О. Патона [8]. Схема плазмотрона приведена на рис. 1. Данный плазмотрон

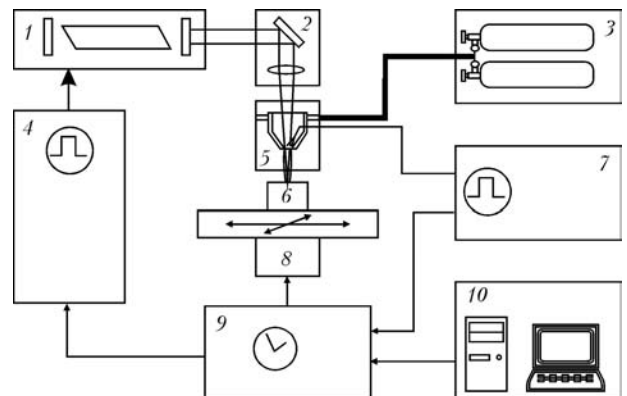


Рис. 2. Функциональная схема экспериментального комплекса (обозначения см. в тексте)



вместе с источником питания установки МПУ-4, который был модифицирован для работы в составе комплекса, обеспечивает несколько режимов горения микроплазменной дуги, включая непрерывный и импульсно-периодический с прямой и обратной полярностью импульсов тока при средней мощности дуги до 600 Вт. Сменное плазмформирующее сопло 12 из меди с каналом диаметром 1 или 1,5 мм предназначено для ограничения поперечных размеров и пространственной стабилизации столба дуги.

На рис. 2 представлена функциональная схема экспериментального комплекса. Лазерная составляющая комплекса состоит из генератора лазерного излучения 1, системы транспортировки и фокусировки излучения 2 и блока управления излучением лазера 4. Дуговая составляющая комплекса состоит из интегрированного плазмотрона 5, источника питания микроплазменной дуги 7 и системы подачи газа 3. Интегрированный плаз-

мотрон установлен на системе фокусировки лазерного излучения, что обеспечивает соосность лазерного пучка и дуги. Система управления 10 и система синхронизации импульсов 9 обеспечивают синхронизацию лазерного импульса с импульсом тока дуги и движение двухкоординатного стола 8 для реализации процесса гибридной обработки образца 6. Внешний вид экспериментального комплекса представлен на рис. 3, а различные режимы его работы — на рис. 4.

Рис. 5 иллюстрирует лицевую поверхность наплавочных швов, полученных на образцах из нержавеющей стали при дуговом и гибридном лазерно-дуговом воздействии. Параметры режимов горения микроплазменной дуги прямой полярности, соответствующие этим фотографиям, приведены в табл. 1. Движение стола осуществлялось справа налево, и, как видно из рис. 5, дополнительное использование импульсов лазерного излучения приводит к контрагированию анодного пятна дуги и заметному уменьшению ширины шва.

Результаты предварительных экспериментальных исследований показали заметное улучшение



Рис. 3. Внешний вид экспериментального комплекса для исследования импульсных гибридных процессов

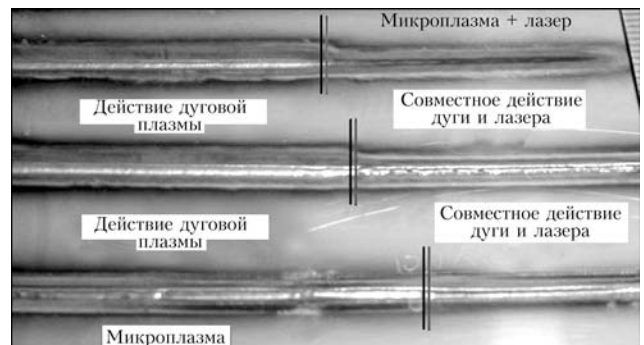


Рис. 5. Наплавочные швы при микроплазменной и гибридной лазерно-микроплазменной сварке нержавеющей стали толщиной 1 мм (средняя мощность лазерного излучения 35...40 Вт)

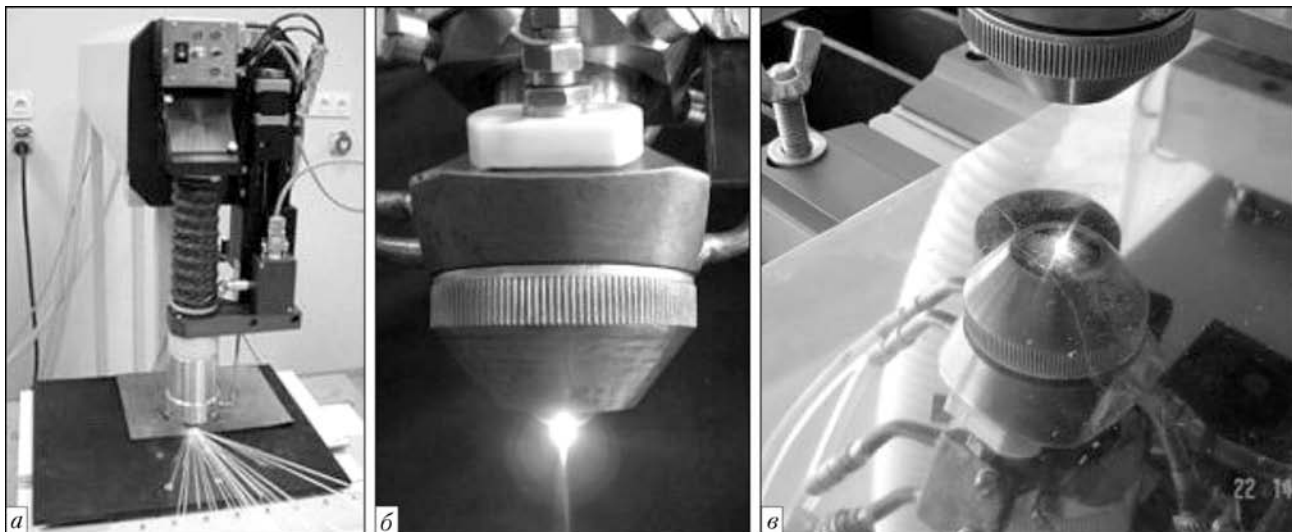


Рис. 4. Экспериментальный комплекс в работе

Таблица 1. Параметры режима горения микроплазменной дуги для швов, представленных на рис. 5

Способ сварки	Ток дуги, А	Длительность импульса, мс	Длительность паузы, мс	Частота повторения, Гц	Скорость сварки, м/мин
Импульсный	18	10	7	60	0,18
					0,12
Непрерывный	16	—	—	—	0,3

Таблица 2. Параметры режимов работы лазерного излучателя (частота 70 Гц, длительность импульса 1 мс) в экспериментах, результаты которых представлены на рис. 8

№ образца	Ток, А	Средняя мощность, Вт	Мощность импульса, Вт	Интенсивность, 10^{-6} Вт/см ²
1	100	61	870	5,0
2	150	72	1000	5,8
3	200	80	1150	6,5
4	250	87	1250	7,0

качества гибридной сварки (уменьшение ширины шва и увеличение глубины проплавления) по сравнению с микроплазменной, даже когда часть мощности, вносимой лазерным излучением, составляет лишь 10...15 % суммарной мощности используемых источников.

Чтобы проанализировать механизм этого явления, выполнили ряд экспериментов. Прежде всего электрические измерения показали некоторое уменьшение напряжения на дуге при включении лазерного излучения (рис. 6). Это можно рассматривать как косвенное качественное доказательство увеличения эффективности разряда при одновременном использовании обоих источников. Подобный эффект теоретически описан в работе [9].

Измерение сопротивления разрядного промежутка под воздействием импульса лазерного излучения было произведено с низким (5 В) на-

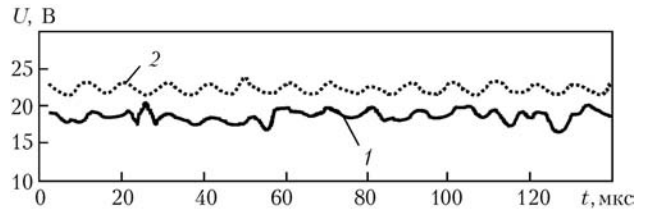


Рис. 6. Напряжение на дуге при микроплазменной (штриховая) и лазерно-микроплазменной (сплошная кривая) сварке

пряжением источника питания и ограничивающим шунтом 1000 Ом для предотвращения инициирования дугового разряда (рис. 7). Необходимо отметить, что сопротивление промежутка во время лазерного импульса еще ниже, чем сопротивление шунта (напряжение на промежутке ниже 2 В), т. е. электронная концентрация в лазерном факеле выше, чем в дуговом разряде.

Эффекты взаимодействия лазерного излучения и микроплазменной дуги прямой полярности при сварке алюминия еще более примечательны, поскольку имеющаяся на поверхности металла оксидная пленка ухудшает стабилизацию анодного пятна дуги. Лазерная энергия в данном случае может использоваться для удаления этой пленки в зоне фокального пятна. На рис. 8 представлены результаты экспериментов для алюминиевых образцов при воздействии импульсной микроплазменной дуги и при гибридном лазерно-дуговом воздействии. Параметры лазерного импульса в рассматриваемых экспериментах приведены в табл. 2.

Варьирование лазерной мощности позволяет экспериментально определить пороговую интенсивность лазерного излучения, требуемую для удаления оксидной пленки. При превышении этого значения исчезают флуктуации положения анодного пятна, типичные для дуги прямой полярности, и происходит его привязка к фокальному пятну, что отчетливо видно на рис. 8, з. Предыдущее изображение (рис. 8, в) соответствует пороговому значению интенсивности лазерного излучения и дает в соответствии с табл. 2 экс-

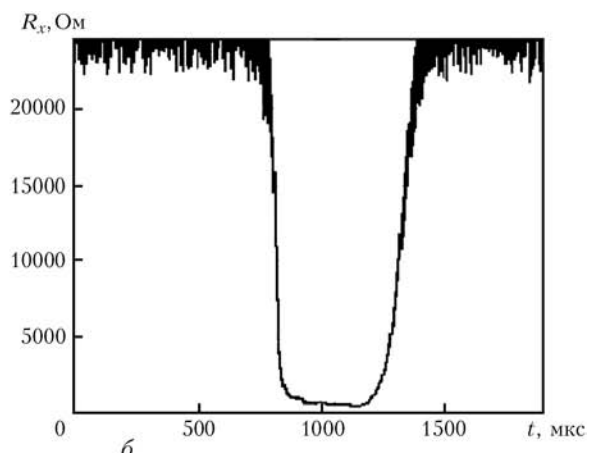
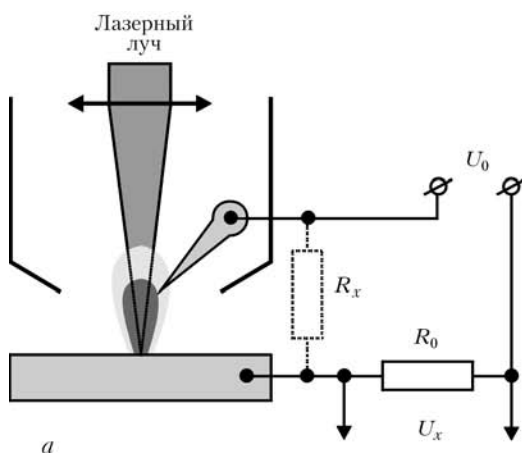


Рис. 7. Схема (а) и результат (б) измерения сопротивления разрядного промежутка в присутствии лазерной плазмы

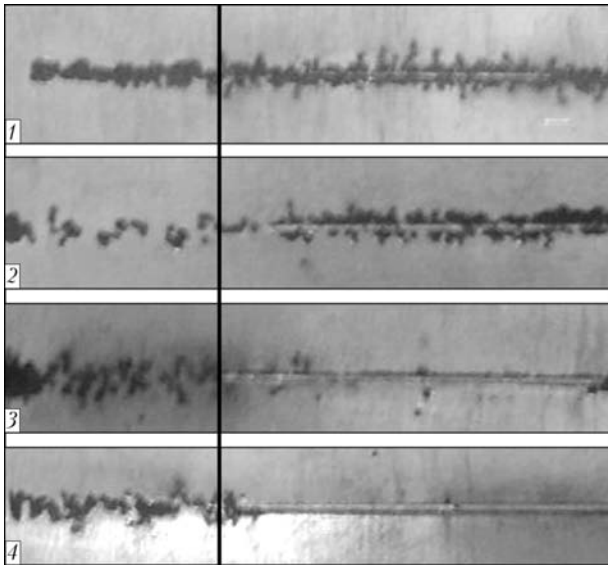


Рис. 8. Результаты воздействия на поверхность алюминия микроплазменной дугой постоянного тока прямой полярности (слева) и лазерно-микроплазменного воздействия (справа) (1–4 см. в табл. 2)

периментальное значение интенсивности, необходимое для удаления поверхностной пленки, равное $6,5 \cdot 10^6$ Вт/см². Анализ механизма разрушения пленки показал, что возможны два варианта: первый связан непосредственно с поглощением в пленке и ее дальнейшим испарением, в то время как второй обусловлен поглощением в металле (рис. 9). Чтобы оценить температуру алюминиевой поверхности, необходимо решить задачу теплопроводности. В нашем случае можно пренебречь теплопроводностью в боковых направлениях, таким образом, температура поверхности при прямоугольной форме лазерного импульса может быть определена по следующей формуле [10]:

$$T = \eta I \frac{\sqrt{\chi t / \pi}}{\lambda}, \quad (1)$$

где η — коэффициент поглощения лазерного излучения поверхностью алюминия; I — плотность мощности лазерного излучения; χ — температу-

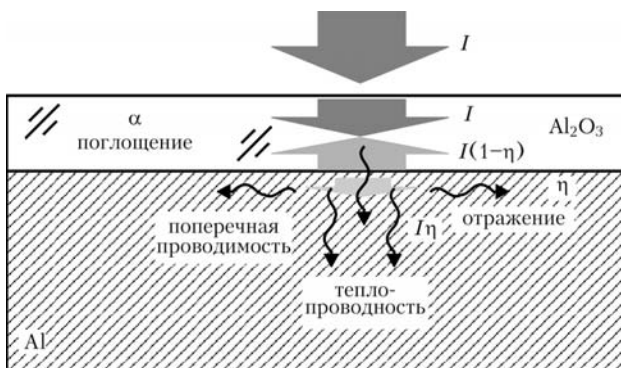


Рис. 9. Схема процессов поглощения излучения, отражения и теплопередачи при удалении оксидной пленки с алюминиевой поверхности

ропроводность; t — время действия (длительность импульса); λ — теплопроводность алюминия.

Исходя из гипотезы, что вся энергия расходуется на нагрев металла до температуры испарения, можно получить выражение для необходимой лазерной интенсивности. В этом случае получается оценка снизу, поскольку не учитываются потери энергии на плавление, частичное испарение, необходимое для разрыва оксидной пленки и слабого поперечного теплоотвода. Значение лазерной интенсивности, вычисленное по формуле (1), оказалось равным $4,5 \cdot 10^6$ Вт/см², что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Оценка второго возможного механизма, связанного с поглощением излучения в оксидной пленке, может быть проведена по выражению, которое учитывает двойной проход излучения через пленку из-за отражения от алюминиевой поверхности:

$$I = \frac{c\rho T}{\alpha t(2 - \eta)}, \quad (2)$$

где c — теплоемкость; ρ — плотность; α — коэффициент объемного поглощения пленки.

Полученное значение $2,5 \cdot 10^6$ Вт/см² оказалось существенно ниже экспериментально наблюдаемого порога. Этот факт может быть объяснен эффективной теплопередачей от пленки к алюминиевому основанию из-за малой толщины пленки, которая гарантирует достаточно высокую теплопроводность в миллисекундном диапазоне.

Импульсный режим работы обоих источников тепла дает возможность проводить эксперименты по количественному исследованию потенциального синергетического эффекта. Чтобы исключить взаимное влияние лазерного излучения и плазмы дуги, можно использовать временные задержки между их импульсами так, чтобы исследуемый источник начинал действовать на металлическую поверхность только после завершения действия другого. В этом случае оценка вложенной мощности и значение теплового эффекта должны быть основаны на достаточно прецизионной методике, и ее разработка является одной из перспективных научных проблем.

Разработанный экспериментальный комплекс для исследования процессов гибридной лазерно-микроплазменной сварки и обработки материалов имеет следующие характеристики:

- лазерный источник формирует импульс с управляемой формой, пиковой мощностью до 4 кВт и интенсивностью до 10^7 Вт/см² в зоне обработки;
- дуговой источник имеет четыре режима, включая импульсы переменной полярности, с частотой повторения до 70 Гц и амплитудой тока до 30 А;



– система синхронизации дает возможность изменения задержки между импульсом лазерного излучения и импульсом тока дуги;

– коаксиальная схема подачи лазерного излучения в плазмообразующее сопло приводит к максимальной эффективности воздействия на обрабатываемый металл обоих источников;

– устройство плазматрона позволяет регулировать расход газовой смеси и обеспечивает раздельную подачу защитного и плазмообразующего газов;

– двухкоординатный стол дает возможность автоматического регулирования параметров движения образца в диапазоне линейной скорости от 0,006 до 0,6 м/мин с независимым вертикальным перемещением плазматрона над обрабатываемой поверхностью.

Предварительные эксперименты, выполненные с помощью разработанного комплекса оборудования, показали его широкие возможности в области исследования импульсных гибридных процессов сварки и обработки материалов и развития соответствующих технологий. Полученные результаты доказывают возможность существенного влияния взаимодействия импульсов лазерного излучения и тока дуги на форму проплавления. Классификация факторов такого взаимодействия и их количественная оценка требует дальнейших исследований, в том числе с проведением металлографического анализа различных зон сварного шва с целью определения оптимальных режимов процесса для получения требуемых свойств соединения, а также дальнейшего

развития теоретической модели совместного воздействия на металл двух импульсных источников тепла.

1. Steen W. M., Eboo M. Arc augmented laser welding // Metal Construction. — 1979. — **11**, № 7. — P. 332–335.
2. Diebold T. P., Albright C. E. «Laser-GTA» welding of aluminium alloy 5052 // Welding J. — 1984. — **63**, № 6. — P. 18–24.
3. Гибридная лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, И. В. Кривцун и др. // Автомат. сварка. — 2002. — № 3. — С. 5–9.
4. Особенности нагрева металла при лазерно-дуговой сварке / С. Г. Горный, В. А. Лопота, В. Д. Редозубов и др. // Там же. — 1989. — № 1. — С. 73–74.
5. Pat. 5700989 USA. Combined laser and plasma arc welding torch / I. S. Dykhno, I. V. Krivtsun, G. N. Ignatchenko. — Publ. 23.12.97.
6. Seyffarth P., Krivtsun I. V. Laser-arc processes and their applications in welding and material treatment // Welding and allied processes. — London: Taylor and Francis Books, 2002. — Vol. 1. — 200 p.
7. Dillthey U., Lueder F., Wieschemann A. Process-technical investigations on hybrid technology of laser beam-arc welding // Proc. of 6th Intern. conf. on welding and melting by electron and laser beams. — Toulon, France, 1998.
8. Кривцун И. В. Проведение экспериментов по микроплазменной сварке различных металлов малых толщин и выбор соответствующих режимов горения дуги для гибридной сварки (Науч. техн. отчет) / Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАНУ. — Киев, 2005.
9. Special features of formation of plasma torch under conditions of hybrid laser-arc welding / G. Turichin, A. Grigor'ev, E. Zemlyakov et al. // High Temperature. — 2006. — **44**, № 5. — P. 647–655.
10. Simulation of laser induced quartz ablation for nano powder production / A. Abdurahmanov, V. Lopota, V. Sysoev, E. Pozdeeva // Proc. of 5th Intern. conf. on beam technologies & laser application, St.Petersburg, 2006.

An experimental set up was developed to study the processes of pulsed hybrid (laser-microplasma) welding and treatment of materials using the radiation of pulsed-periodic Nd:YAG-laser with a wide range of adjustment of parameters of the pulse and pulsed low-ampere arc, combined by means of an integrated plasmatron. The proposed algorithms of spatial and time synchronization of two pulsed energy sources for a combined impact on materials enable studying the processes of laser-microplasma welding of steel for car construction, treatment of aluminium alloys and sintering of nanomaterials.

Поступила в редакцию 22.02.2008

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Решением Президиума ВАК Российской Федерации от 4 июля 2008 г. журнал «Автоматическая сварка» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.