



Рис. 1. Оптический блок системы «Регистратор» (а), цифровая высокоскоростная камера CENTURIO C100 (б) и линзовый спектрограф SL100M (в)

составных образцов из металла и оптически прозрачного материала [5] показала непрерывное изменение формы канала, квазипериодическое движение зоны с максимальной яркостью по глубине канала, а также наличие таких зон на задней стенке канала. Съемка плазменного факела также показывает наличие его квазипериодических флуктуаций [6].

Сравнительные исследования движения жидкого металла на поверхности сварочной ванны и процесса образования корневых пиков подтверждают соответствие между пикообразованием и выплескиванием расплавленного металла из сварочной ванны. Такие же результаты были получены позднее при рентгеновской съемке [7].

В экспериментах использовали гибридную лазерно-дуговую сварочную установку, разработанную и собранную в ИЛиСТ СПбГПУ. В качестве источника лазерного излучения использовали итербиевый волоконный лазер ЛС-15 с максимальной выходной мощностью 15 кВт. Излучение транспортировалось по волоконному кабелю к оптической сварочной головке лазерно-дугового модуля. Для фокусировки излучения использовали сварочную головку YW50 ZK фирмы «Precitec» с фокусным расстоянием 400 мм и фокальным диаметром 0,4 мм, оснащенную однокоординатным сканатором DC-Scanner с максимальной частотой 600 Гц и амплитудой до 10 мм. Экспериментальная установка также укомплектована источниками питания дуги ВДУ-1500ДС и EWM Phoenix 520 RC PULS. Для подачи присадочного материала использовали механизмы подачи проволоки ПДГО-511 и PHOENIX DRIVE 4 ROB 2.

В ходе экспериментов проплавливали и сваривали встык плоские образцы размерами 100×50 мм из сплавов АМг6 толщиной 10 мм и 1424 (Al–4,5 % Mg–1,7 % Li + 0,6 % Zn) толщиной 4 мм. Сварку осуществляли прямолинейными стыковыми швами в нижнем положении. Для защиты сварочной ванны и металла шва использовали аргон и смесь аргона с гелием, а в качестве присадочного материала — проволоку марки А1Mg6Zr.

Качество всех сварных швов оценивали визуально по их внешнему виду и на основании металлографических исследований поперечных

шлифов. Определяли глубину проплавления и другие параметры геометрии шва.

Для определения временных характеристик динамических процессов в зоне гибридного разряда над поверхностью изделия применяли систему регистрации плазменного факела (рис. 1), включающую блок оптической регистрации с объективом, кассету для светофильтров и CCD матрицей для регистрации сигнала и модуль цифровой обработки сигнала, а также высокоскоростную видеокамеру CENTURIO C100, позволяющую проводить съемку со скоростью до 100 000 кадров/с. Для исследования спектра оптической эмиссии плазменного факела использовали линзовый спектрограф с компенсацией астигматизма SL100M.

Результаты компьютерного моделирования, полученные с помощью динамической модели (рис. 2), показывают, что, несмотря на стабилизацию всех параметров технологического режима процесс высокоскоростной сварки металлов больших толщин следует считать нестационарным. При этом наиболее нестабильна прикорневая часть парогазового канала и канала проплавления. На рис. 2, а, где представлены поперечные сечения сварного шва, выполненного лазерной сваркой на одних и тех же параметрах режима с интервалом 1 мс, видно характерное сужение шва, которое может привести к образованию дефекта. Получить более стабильную сварочную ванну можно путем введения кругового сканирования лазерного луча с небольшими (до 0,5 мм) радиусами и высокой (свыше 300 Гц) частотой сканирования (рис. 2, б). При отсутствии такой стабилизации в результате коллапса парогазового канала возможно формирование пор большого диаметра и корневых пиков.

Эксперименты показали, что динамическое поведение яркости излучения расплава характеризуется наличием низкочастотных колебаний. Данные частоты определяли с помощью компьютерного моделирования с использованием динамической модели, а также экспериментально с помощью фотодиодов, направленных на сварочную ванну. Характерный частотный спектр сигнала с фотодиодов представлен на рис. 3.

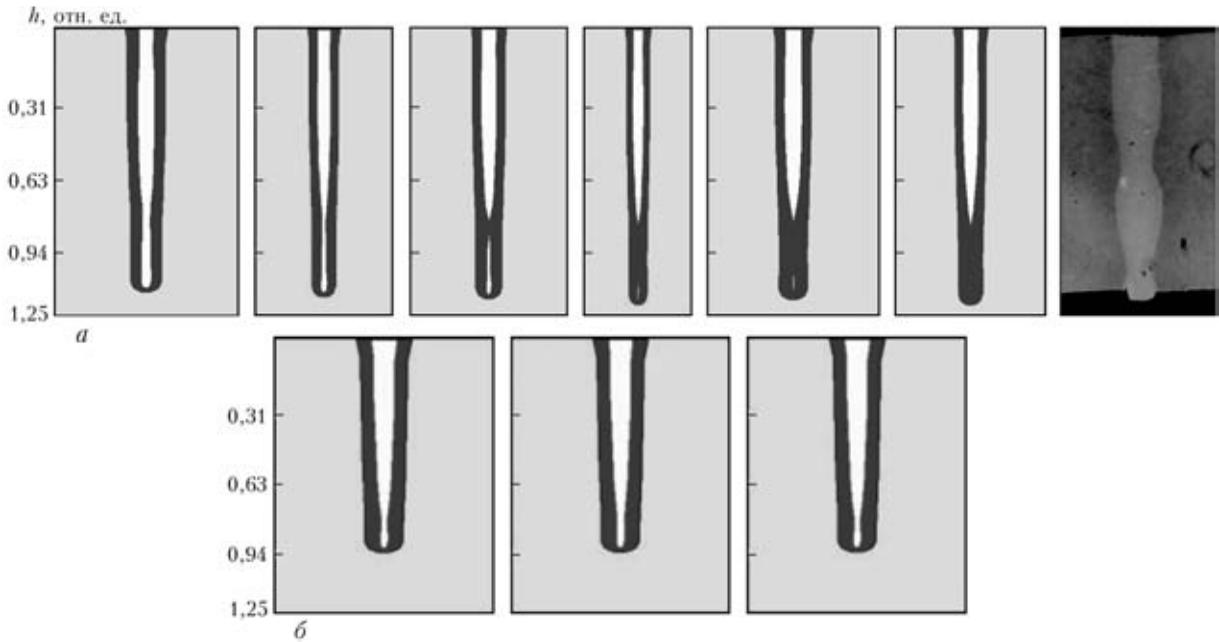


Рис. 2. Расчетные формы проплавления при $v_{св} = 10$ м/с: *а* — через каждую 1 мс, $N = 15$ кВт; *б* — через каждые 3 мс, $N = 12$ кВт

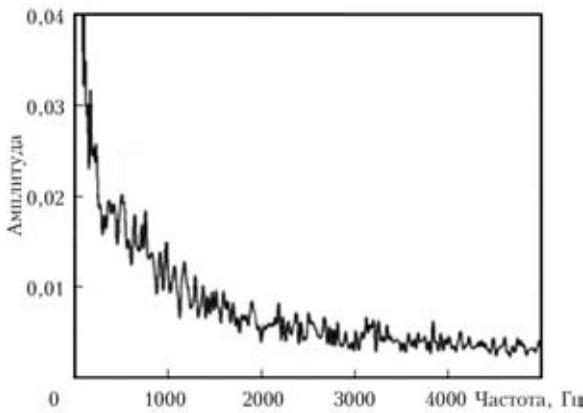


Рис. 3. Частотный спектр колебаний расплава

Скорость видеосъемки определяется частотой колебаний расплава. Анализ динамического поведения ванны расплава показал, что в расплаве отсутствуют колебания с частотами более 500 Гц. Таким образом, для наблюдения за поверхностью сварочной ванны необходимо проводить съемку со скоростью не менее 1000 кадров/с (рис. 4).

Анализ кадров скоростной видеосъемки позволил определить положение электрода относительно лазерного луча.

Результаты расчета количества легирующих элементов, проведенного в программе LaserCAD, для различных толщин и параметров режима для сплава 1424 приведены на рис. 5. Уменьшение скорости сварки приводит к увеличению потерь легколетучих легирующих элементов, которые обеспечивают высокие эксплуатационные характеристики сплавов, что и приводит к разупрочнению сварного шва.

Содержание примесей в металле шва при сварке на пониженных скоростях за счет испарения существенно отличается от их содержания в основном материале, особенно в верхней части расплавленной зоны, где радиус канала максимален. Поскольку верхняя часть парогазового канала является определяющей для процесса многократных переотражений в канале, испарение примесей значительно изменяет форму и размеры зоны проплавления. Пример такого уширения представлен на рис. 6. Увеличение погонной энергии привело

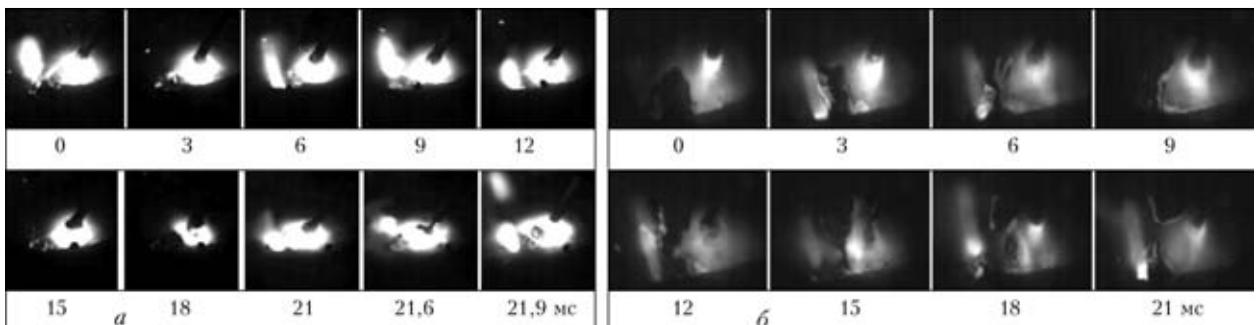


Рис. 4. Кадры видеосъемки процесса формирования и отрыва капли при гибридной сварке от источников питания дуги EWM Phoenix 520 RC PULS (*а*) и ВДУ-1500ДС (*б*) при $N = 15$ кВт, $v_{св} = 6$ м/мин, $I_{св} = 120$ А

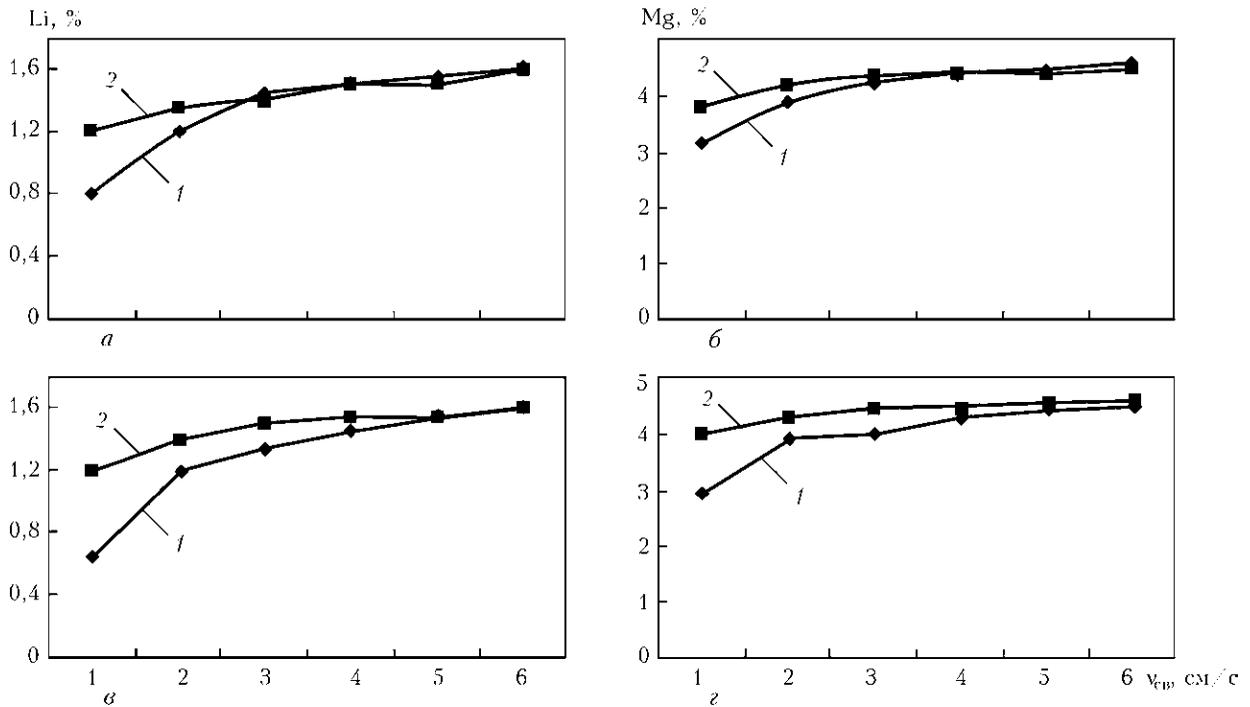


Рис. 5. Расчетное содержание лития (а, в) и магния (б, г) в металле шва на поверхности образца при лазерной сварке сплава Al – 4,5 % Mg – 1,7 % Li – 0,6 % Zn при $N = 3500$ (а, б, г), 3000 (в) Вт, $d = 0,3$ мм и толщинах 4 (1) и 10 (2) мм

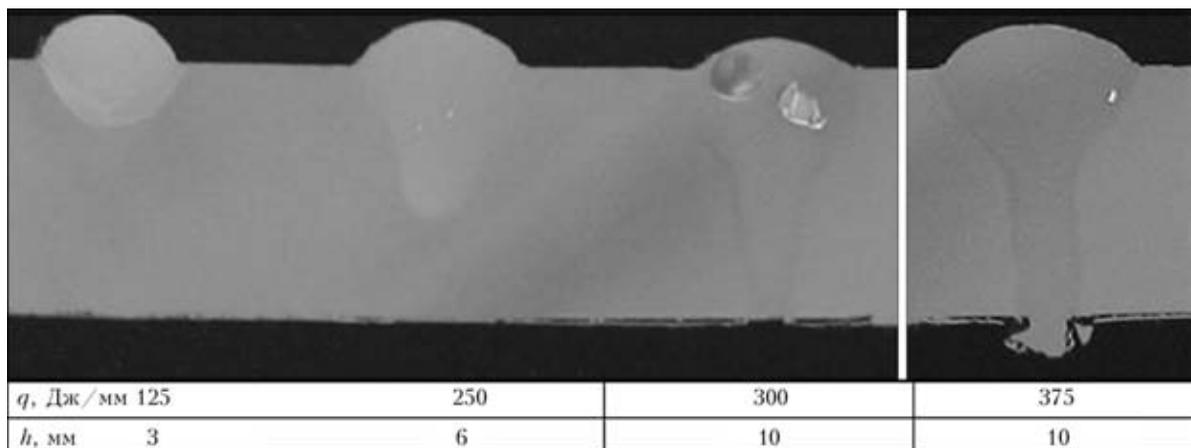


Рис. 6. Результаты лазерного проплавления с присадочной проволокой пластины из АМг6 ($v_{п.п} = 19$ м/мин)

к существенному росту ширины зоны проплавления при лазерной сварке с присадочным материалом.

Для определения положения электрода относительно лазерного луча, кроме высокоскоростной видеосъемки, проводили расчеты термических циклов и измерения микротвердости в зоне лазерного воздействия (рис. 7).

При гибридной сварке наблюдается однородная по всему сечению металла шва структура, состоящая из мелких дендритов. В случае увеличенного расстояния между тепловыми источниками наблюдается более продолжительное пребывание металла шва при повышенных температурах и, как следствие, увеличение размеров дендритов в верхней части шва. При гибридном процессе микротвердость металла шва приближается к мик-

ротвердости основного материала, что обусловлено как его мелкодендритной структурой, так и более высоким содержанием магния.

Дальнейшие эксперименты проводили при максимальных скоростях сварки и расстоянии между лазерным лучом и электродом 2 мм.

Пример моделирования гибридной сварки сплава АМг6 приведен на рис. 8.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа, представленные на рис. 9, подтвердили расчетные значения. Из представленных на рисунке результатов видно, что использование присадочного материала позволяет компенсировать потери легирующих элементов.

На рис. 10 представлено поперечное сечение и микроструктура металла стыкового сварного шва со сквозным проплавлением пластин толщиной

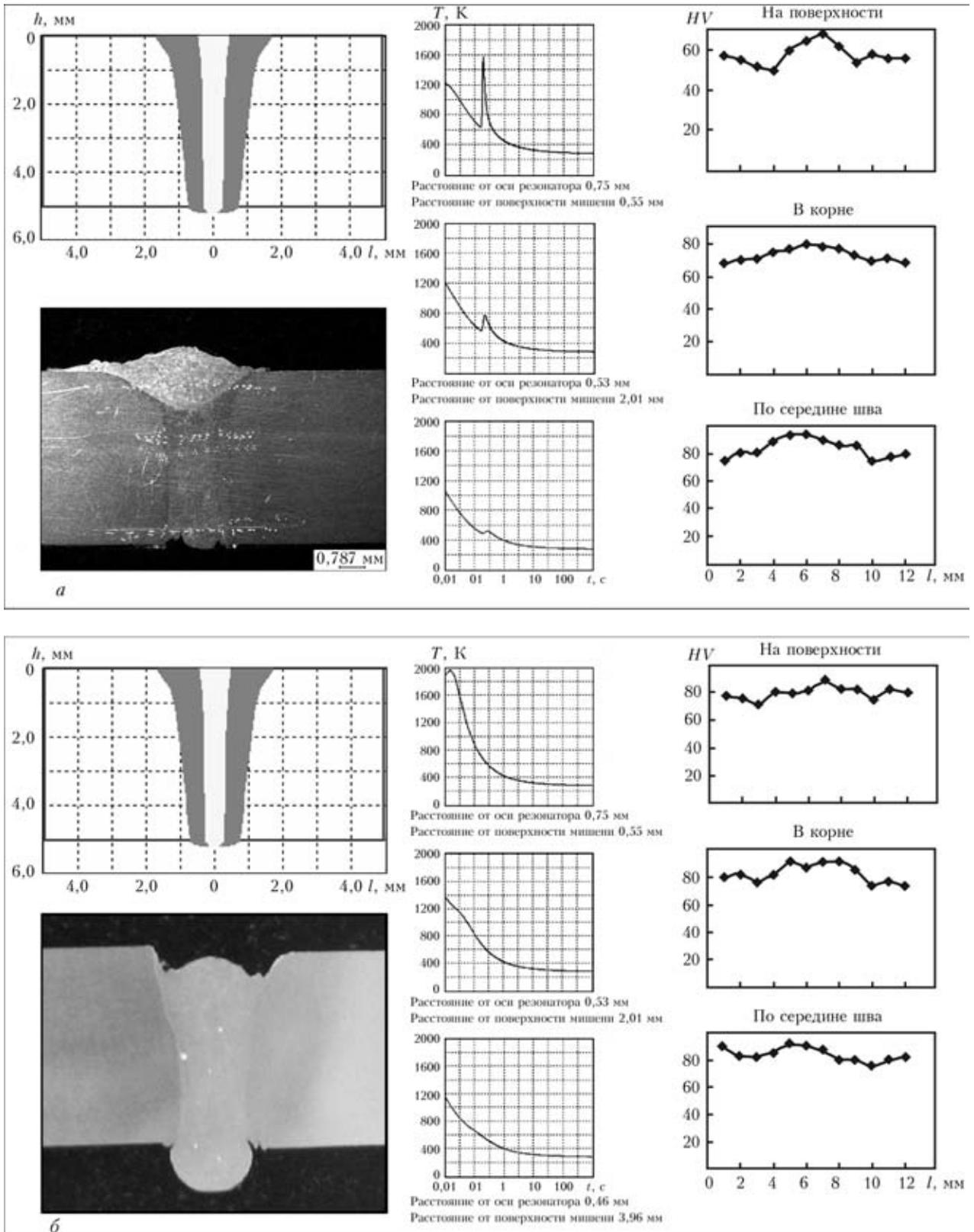


Рис. 7. Расчетные данные формы поперечного сечения, термических циклов сварного шва и измерение микротвердости после ЛДС алюминиевого сплава ($q = 100$ Дж/мм): a, b — расстояние между лазерным лучом и электродом соответственно 15 и 2 мм

10 мм из сплава АМг6 ($q = 175$ Дж/мм), а также в качестве примеров сварки других сплавов представлены поперечные сечения сварных швов пластин из сплавов Al – 4,5 % Mg – 1,7 % Li – 0,6 % Zn и Al–Mg₃ толщиной 5 мм ($q = 100$ Дж/мм).

В ходе работы был разработан и изготовлен лазерно-дуговой технологический комплекс (ЛДТК). В его состав (рис. 11) входят лазерная установка (волоконный лазер), комплекс дугового оборудования, модуль лазерно-дуговой (рабочий

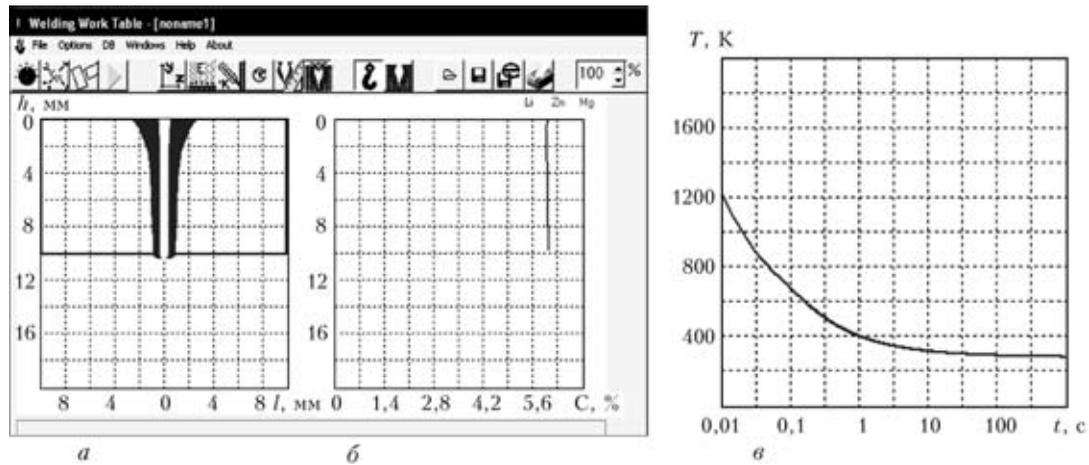


Рис. 8. Расчетное поперечное сечение зоны проплавления (а), распределение магния по глубине шва (б) и термический цикл гибридной сварки сплава АМгб (в)

	ЛС	ЛДС+МИГ	ЛС+МИГ
Объект исследования			
На поверхности	5,298	6,485	3,135
В корне	4,624	5,871	3,274
По середине	5,710	5,510	3,279
Основной металл		6,442	2,648
Сварочная проволока		6,25	

Рис. 9. Распределение количества магния по глубине сварного шва при различных процессах сварки алюминиевого сплава

инструмент), манипулятор, блок подготовки и распределения газов, подсистема мониторинга свариваемого стыка (наведение на стык), подсистема мониторинга технологического процесса, система автоматического управления. ЛДТК оснащен системой наведения лазерно-дугового модуля на свариваемый стык на основе триангуляционного лазерного датчика, которая осуществляет контроль геометрических характеристик стыка, слежение за координатами стыка при скорости сварки до 6 м/мин с параметрами: $\pm 0,5$ мм в поперечном на-

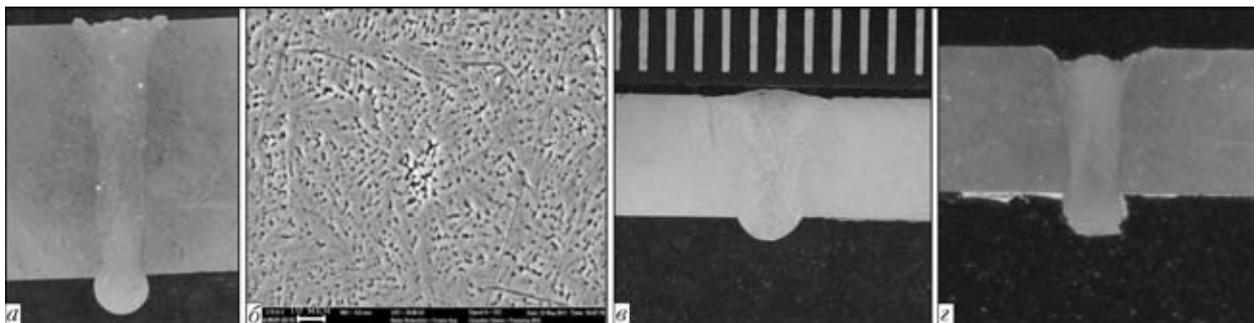


Рис. 10. Поперечное сечение сварных швов при ЛДС сплавов АМгб (а), Al-4,5% Mg-1,7% Li-0,6% Zn (в), Al-Mg₃ (г) и микроструктура металла шва сплава АМгб (б)



Рис. 11. Общий вид ЛДТК

равлении к стыку и $\pm 0,2$ мм в вертикальном направлении.

Результаты исследований динамики поведения сварочной ванны и пароплазменного факела позволили разработать оборудование для контроля технологического процесса, интегрированное в систему мониторинга параметров процесса сварки.

Выводы

1. Показана возможность повышения качества сварных швов с помощью сканирования.



2. Установлены требуемые частоты сканирования, соответствующие флуктуациям сварочной ванны.

3. Показана зависимость характера проплавления и свойств металла шва от расстояния лазерный луч – дуга.

4. Показано, что количество легирующих элементов в металле шва убывает с уменьшением скорости сварки.

5. Подтверждено, что присадочный материал компенсирует потери легирующих элементов при ЛДС.

6. Получены сварные соединения сплавов на основе алюминия с большим отношением глубины к ширине, характеризующиеся высоким качеством металла шва и малыми деформациями.

1. *Turichin G.* Model of laser welding for technology application // Proc. of the Academy of Sci., Phys. Ser. — 1997. — **61**, № 8. — P. 1613–1618.

2. *Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding / A. Matsunawa, M. Mizutani, S. Katayama, N. Seto // Welding Intern.* — 2003. — **17**, № 6. — P. 431–437.

3. *Theoretical description of the dynamic phenomena in laser welding with deep penetration / V. Lopota, G. Turichin, I. Tzibulsky et al.* — Bellingham/Wash.: SPIE, 1999 (SPIE Proceedings Series 3688). — P. 98–107.

4. *Forsman T., Powell J., Magnusson C.* Process instability in laser welding of aluminum alloys at the boundary of complete penetration // J. of Laser Applications. — 2001. — **13**, № 10. — P. 193–198.

5. *Bashenko V. V., Mitkevich E. A., Lopota V. A.* Peculiarities of heat and mass transfer in welding using high energy density power sources: 3d Intern. Coll. on EBW. — Lion, 1983. — P. 61–70.

6. *Лопота В. А., Смирнов В. С.* Структура материала и его параметры в зоне действия луча при лазерной сварке с глубоким проплавлением // Физ. и химия обработки материалов. — 1989. — № 2. — С. 104–115.

7. *Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding / A. Matsunawa, J.-D. Kim, N. Seto et al. // J. of Laser Applications.* — 1998. — **10**, № 12. — P. 247–254.

Results of computer modelling of the process of hybrid welding of aluminium alloys of the Al–Mg system up to 10 mm thick by using a dynamic model are considered. Examples of computation of the welding process parameters and their experimental confirmation are given. The developed technological laser-arc system for implementation of the hybrid welding process is described.

Поступила в редакцию 06.07.2011

7-я Международная конференция

«ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРОВ»

18–21 сентября 2012 г.

Санкт-Петербург

Институт лазерных и сварочных технологий СПбГПУ и Российско-германский центр лазерных технологий приглашают принять участие в 7-й Международной конференции «Лучевые технологии и применение лазеров».

Тематика конференции:

- Физические основы лучевых технологий
- Нанофотоника
- Математическое моделирование лучевых технологий
- Технологии резки, прошивки отверстий, маркировки, гравировки и скрайбирования
- Технологии сварки, наплавки и прототипирования
- Оборудование для лучевых технологий
- Контроль качества и безопасность
- Фотонные технологии живых систем и медицинское применение лазеров

www.ilwt-stu.ru