

The System of Laser-Arc Welding Monitoring

Establishment of theoretical connection between the dynamic behavior of the weld pool during hybrid laser-arc welding and the changes of characteristics of the plasma torch can develop and substantiate the principles of monitoring and management of the physical process.

Из сборника докладов 6-й международной конференции "Лучевые технологии и применение лазеров"

О СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ

Установление теоретической связи между динамическим поведением сварочной ванны при гибридной лазерно-дуговой сварке и изменениями характеристик плазменного факела позволяет разработать и обосновать принципы мониторинга и управления этим физическим процессом.

Гибридные лазерно-дуговые технологии обработки материалов являются сложными и многофакторными процессами. Это создает определенные трудности при практическом применении гибридных технологий и препятствует их широкому внедрению в производство. Лазерно-дуговой технологический процесс является динамической системой с распределенными параметрами, управление которой невозможно ни в ручном режиме, ни с использованием стандартных систем числового программного управления (ЧПУ). Выходом из данной ситуации является полная автоматизация гибридных лазерно-дуговых технологических процессов, что требует создания системы автоматического контроля и управления. Применение таких систем, контролирующих в режиме реального времени технологические параметры и работу всех подсистем технологического комплекса, а также осуществляющих текущий контроль качества обрабатываемого изделия обеспечит возможность практического промышленного применения гибридных лазерно-дуговых технологий обработки материалов.

Одной из основных задач для системы текущего мониторинга сварочного процесса является отслеживание и, по возможности, предотвращение формирования дефектов.

Поры являются одним из наиболее распространенных и опасных типов дефектов сварных швов (рис. 1).

Уменьшая площадь сечения сварного шва, крупные поры могут значительно снизить его эксплуатационные характеристики. Мелкие поры в теле шва являются концентраторами механических напряжений, что особенно отрицательно сказывается при усталостной нагрузке.

Пористость сварных швов хорошо изучена при традиционных видах сварки, но при лазерной и лазерно-дуговой сварке с глубоким проплавлением причины и механизмы образования пор существенно отличаются от известных. Действительно, существующий при этих видах сварки парогазовый канал за счет развития на его поверхности различных неустойчивостей сам является источником пористости, а колебания его глубины при дефиците жидкой фазы на стенках в нижней части канала могут приводить к развитию специфической для лучевых видов сварки корневой пористости (рис. 2). Существенную роль играет также величина зазора

Г.А. Туричин, д.т.н., профессор,
И.А. Цибульский, к.т.н., доцент,
Е.В. Земляков, ассистент,
Институт лазерных и сварочных технологий,
В.В. Харламов, инженер, Центр лазерных технологий

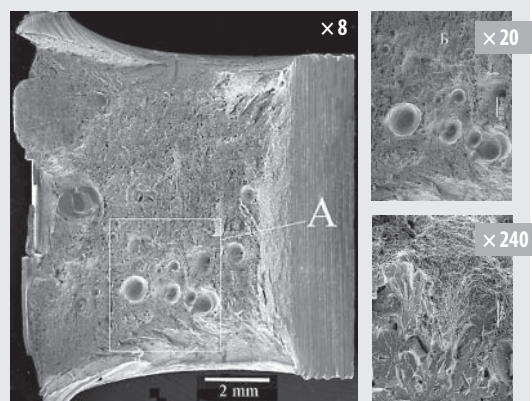


Рис. 1. Фрактографическое исследование изломов ударных образцов

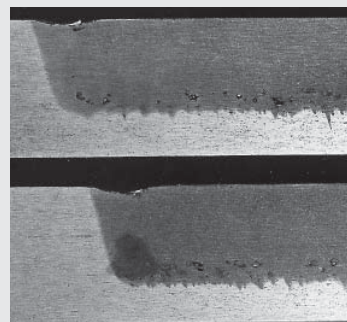


Рис. 2. Продольный макрошлиф лазерного сварного шва

между свариваемыми изделиями и наличие растворенных остаточных газов в свариваемом материале.

Корневые пики (пики проплавления) также являются характерным для этого вида сварки типом дефектов сварного шва, формирование которых связано с физической природой процесса лучевой сварки.

Образование пор и корневых пиков при лазерно-дуговой сварке связано с особенностями протекания физических процессов тепло-массопереноса и транспортировки энергии излучения в зоне обработки. Основными причинами образования дефектов при лучевых видах сварки являются: развитие термокапиллярных волн большой амплитуды на поверхности парогазового канала и колебание его глубины.

Для количественного описания процессов формирования дефектов использовалась динамическая модель лазерной и лазерно-дуговой сварки, построенная на основе механики Лагранжа. Данная модель описывает волновое движение поверхности парогазового канала и изменение со временем формы и размеров сварочной ванны (рис. 3).

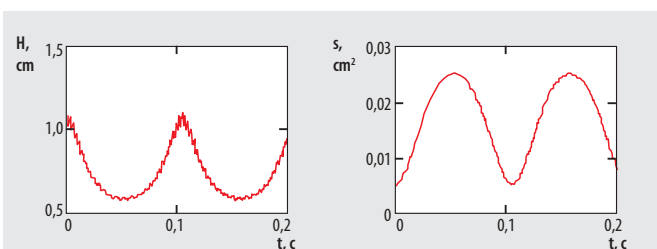


Рис. 3. Временное поведение глубины парогазового канала и площади его поперечного сечения:

мощность излучения — 5 кВт; скорость сварки — 1 см/с; материал — низкоуглеродистая сталь

Легко заметить, что возможны только совместные колебания глубины и радиуса парогазового канала. Фиксируя момент схлопывания парогазового канала (рис. 4), можно получить начальное распределение «зародышей» крупных пор в сварочной ванне.

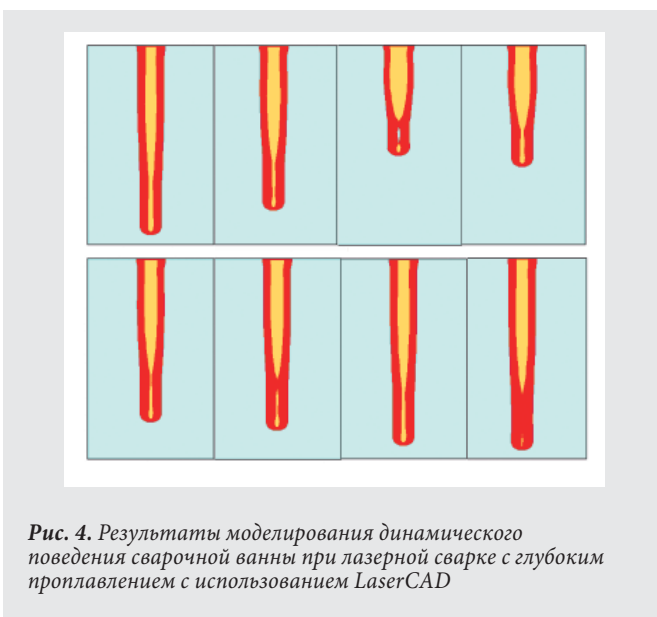


Рис. 4. Результаты моделирования динамического поведения сварочной ванны при лазерной сварке с глубоким проплавлением с использованием LaserCAD

На рис. 4 показаны результаты компьютерного моделирования развития термокапиллярных волн на поверхности парогазового канала, приводящего к формированию корневого пика (спайка) и корневых пор. Результаты расчетов — через 5 мс.



Рис. 5. Спектры колебаний глубины и площади поперечного сечения парогазового канала

Весьма показательными для анализа динамического поведения канала являются не только зависимости его глубины и площади поперечного сечения от времени, но и спектры их колебаний (рис. 5).

Результаты моделирования показывают, что динамическое поведение активной зоны при лучевых способах сварки носит автоколебательный характер и различные обобщенные координаты обладают различными спектрами колебаний. Самые низкие частоты (менее 500 Гц) характерны для колебаний радиуса парогазового канала. В спектре колебаний глубины канала количество высокочастотных составляющих больше, чем в спектре колебаний радиуса.

Первым этапом создания системы контроля и управления гибридными лазерно-дуговыми сварочными процессами является разработка системы слежения за поведением активной зоны при сварке, что подразумевает отслеживание в режиме реального времени динамического поведения таких параметров, как глубина и ширина парогазового канала и сварочной ванны. Поскольку прямое слежение за этими параметрами практически невозможно, наиболее целесообразным представляется отслеживание косвенных информационных сигналов, таких как проводимость плазмы эрозионного факела, оптическое излучение в широком диапазоне длин волн, пространственное положение плазменного факела, а также акустическая эмиссия. Такой подход требует установления корреляций между информационными сигналами и поведением активной зоны при обработке. Для определения временных характеристик динамических процессов в зоне гибридного разряда над поверхностью изделия и установления их связи с динамическими процессами в сварочной ванне были проведены эксперименты по измерению динамического поведения яркости разрядного промежутка. Для этих целей была использована система, состоящая из блока оптической регистрации с объективом и каскетой для светофильтров, а также рpн-фотодиода и модуля цифровой обработки сигнала (рис. 6).



Рис. 6. Система регистрации вторичноэмиссионных сигналов из активной зоны при лазерно-дуговом воздействии на материалы

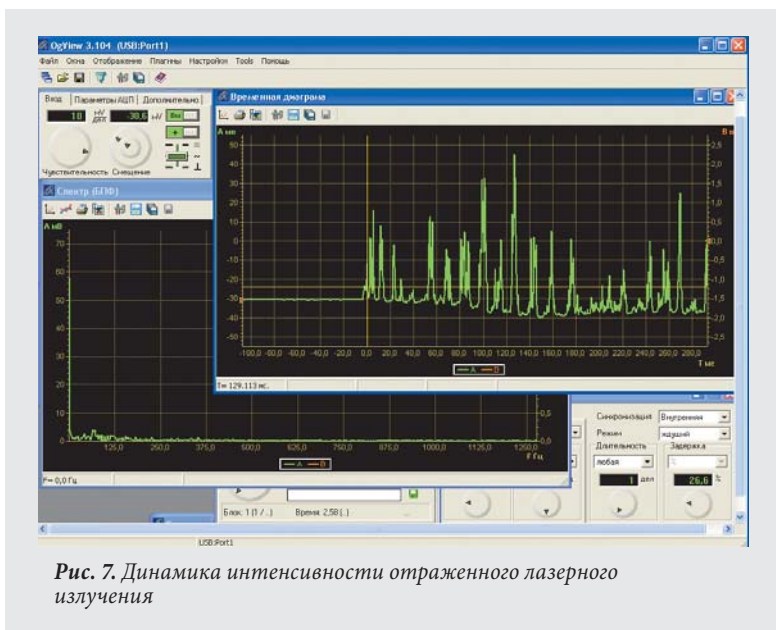


Рис. 7. Динамика интенсивности отраженного лазерного излучения

Для исключения влияния разогретой поверхности образца использовались оптические коллиматоры, ограничивающие размер исследуемой зоны таким образом, что поверхность находилась вне поля зрения оптической системы. Эксперименты показали, что динамика изменения яркости (рис. 7) характеризуется наличием низкочастотных колебаний, спектр которых совпадает со спектром колебаний расплава в сварочной ванне.

Поскольку сигналов, несущих в себе прямую информацию о глубине проплавления, не существует, следует выбрать для контроля сигнал с наиболее простой математической обработкой. Для определения таких сигналов и построения методики их обработки воспользуемся динамической моделью сварочной ванны при лазерной сварке, построенной на основе метода присоединенных масс Кирхгофа. В соответствии с данной моделью мгновенное значение глубины проплавления определяется следующим выражением:

$$H = H_0 + \frac{1}{H_0} \int_0^t dt \int_0^{t'} \frac{(S - s)(\delta F_p - \delta F_\sigma)}{\rho s^2} dt'$$

где

S и s — соответственно площади сечений канала проплавления и парогазового канала;

ρ — плотность расплава;

F_σ — капиллярная сила;

F_p — реактивная сила отдачи паровой струи.

Поскольку F_p представляет собой вертикальную проекцию реактивной силы отдачи паров, ее величина и, соответственно, величина ее девиации δF_p будет зависеть от величины угла наклона плазменного факела к вертикали:

$$F_p = \rho_v V^2 s \cdot \cos^2(\varphi); \quad \delta F_p = \delta(\rho_v V^2 s \cdot \cos^2(\varphi)).$$

Таким образом, для определения девиации реактивной силы необходимо не только определять текущие значения плотности и скорости потока паров (эти величины можно получить с помощью пересчета по уравнению Бернулли на основе измерения d_p), но и измерять в режиме реального времени угол наклона пароплазменной струи к вертикали.

Для проверки гипотезы о связи пространственно-временных характеристик плазменного факела с нестабильностью формирования и глубиной канала была проведена серия натурных экспериментов по сварке модельных оптически прозрачных образцов.

На рис. 8–10 представлены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных.

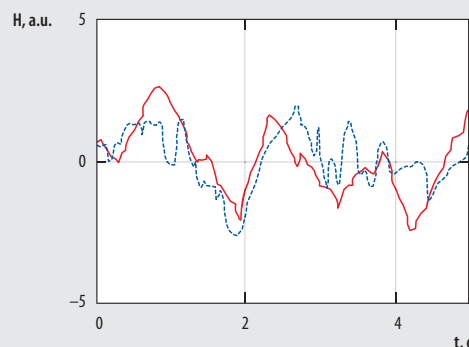


Рис. 8. Сплошная линия — теоретический расчет, пунктирная — результат экспериментального наблюдения по описанной выше методике

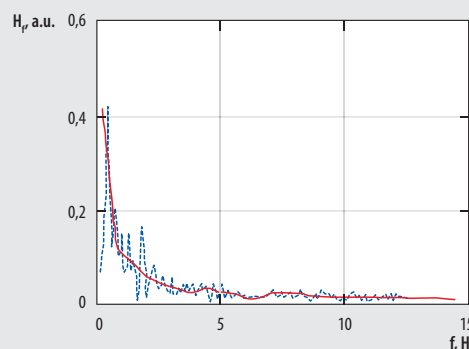


Рис. 9. Пунктирная линия — спектр колебаний глубины канала (по данным эксперимента), сплошная — спектр колебаний глубины канала, рассчитанный по динамической модели процесса сварки

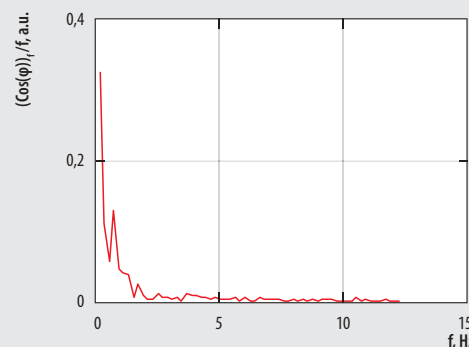


Рис. 10. Отношение спектра колебаний косинуса угла наклона к частоте колебаний (по данным эксперимента)

Следовательно:

принципиальная возможность слежения в режиме реального времени за параметрами парогазового канала и сварочной ванны при лазерной и лазерно-дуговой сварке путем регистрации косвенных информационных сигналов из активной зоны — существует. Установленная связь динамики информационных сигналов и расплава является основой для создания системы текущего мониторинга технологических процессов. Повышение надежности и достоверности разрабатываемых систем мониторинга и управления возможно при использовании мульти-сенсорного подхода: параллельной регистрации сигналов различной физической природы.