



АНАЛИЗ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДУГОВОЙ СВАРКИ (Обзор)

Я. П. ЛАЗОРЕНКО, инж., Е. В. ШАПОВАЛОВ, В. А. КОЛЯДА, кандидаты техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Представлен обзор текущего состояния исследований в области спектрального анализа излучения сварочной дуги. Рассмотрены влияние параметров сварки на спектр излучения сварочной дуги; спектральная диагностика плазмы сварочной дуги; автоматизация сварки на основе спектрального анализа излучения сварочной дуги; мониторинг процесса сварки; автоматическое обнаружение дефектов сварного шва.

Ключевые слова: дуговая сварка, сварной шов, спектр сварочной дуги, спектральный анализ, автоматизация сварки, мониторинг сварки, диагностика сварного соединения, дефекты сварного шва

Идея применения спектрального анализа для автоматизации и мониторинга дуговой сварки состоит в том, что на основе оптического спектра излучения сварочной дуги можно получить ценную информацию о процессе сварки, например обнаружить отклонения параметров сварки от номинальных значений. По этим отклонениям могут быть определены потенциально дефектные участки сварных соединений. Возможность регистрировать отклонения параметров сварки в режиме реального времени позволит регулировать и корректировать сварочный процесс для обеспечения требуемого качества сварных соединений. Следовательно, спектральный анализ может быть использован как для целей мониторинга, так и для автоматизации процесса сварки.

Техническая реализация промышленных систем мониторинга и автоматического управления сваркой на основе спектрального анализа в настоящее время становится возможной благодаря применению современных цифровых спектрометров, осуществляющих измерение оптического спектра за несколько миллисекунд.

Цель данной статьи заключается в обобщении исследований, посвященных спектральному анализу излучения сварочной дуги.

К настоящему времени проведено много исследований в этой области [1–16], при этом развитие получили следующие направления:

исследование влияния параметров сварки на спектр излучения дуги;

спектральная диагностика плазмы сварочной дуги;

мониторинг процесса сварки с помощью анализа спектра излучения дуги;

автоматизация сварки на основе спектрального анализа излучения дуги.

В работах [1–4] исследовано влияние параметров сварки на спектр излучения сварочной дуги. Последний включает непрерывную составляющую, спектральные линии защитного и активного газов, а также спектральные линии металла свариваемых деталей.

В работах [1, 2] проведено экспериментальное исследование влияния сварочного тока на интенсивность спектральных линий металла и защитного газа при сварке ТИГ. В процессе сварки измерены спектры сварочной дуги при разных значениях. В качестве защитного газа применили аргон [1, 2] и гелий [1]. Для сварки использовали листы низкоуглеродистой, а также нержавеющей стали, медь, алюминий и титан. Анализ полученных спектров показал, что при сварке в аргоне с повышением сварочного тока интенсивность спектральных линий металла и защитного газа увеличивается. Эта зависимость имеет нелинейный характер. При сварке в гелии для разных металлов интенсивность их линий либо увеличивается, либо уменьшается, либо сначала увеличивается, а потом уменьшается.

В работе [2] исследовано влияние скорости подачи присадочной проволоки на спектр излучения сварочной дуги при сварке ТИГ. В ходе экспериментов выполнены сварные швы листов низкоуглеродистой стали и измерены спектры сварочной дуги в диапазоне 480...860 нм при различных отклонениях скорости подачи сварочной проволоки $v_{\text{пр}}$ от номинального значения, соответствующего технологическому стандарту. При превышении $v_{\text{пр}}$ номинального значения зафиксировано уменьшение интенсивности излучения дуги во всем диапазоне измеряемых частот спектра. При задержке подачи проволоки ($v_{\text{пр}} = 0$) интенсивность излучения существенно увеличилась на всех участках спектра в пределах диапазона измерений.

Влияние длины сварочной дуги на оптический спектр изучено в работе [3], в которой предложена математическая модель, определяющая зависи-



мость интенсивности излучения сварочной дуги от длины дуги и сварочного тока. Интегральная интенсивность излучения дуги B_{iv} в заданном спектральном диапазоне определяется согласно формуле

$$B_{iv} = G_1 L I^2 \left(e^{G_2/I} - \frac{1}{2} \right) + G_3 I^2 + G_4,$$

где I — сварочный ток; L — длина дуги; G_i — коэффициенты, зависящие от конкретных условий сварки. Как видим, в этой формуле зависимость между интенсивностью излучения B_{iv} и длиной дуги L является линейной.

Для проверки модели на адекватность проведены эксперименты, в которых измеряли интегральную интенсивность излучения дуги в спектральном диапазоне 500...1000 нм при сварке ТИГ стали в аргоне для разных значений длины дуги и сварочного тока. На основе экспериментальных данных рассчитаны коэффициенты G_i . Сравнение измеренных и рассчитанных данных с помощью модели значений B_{iv} показало ее адекватность для диапазона значений длины дуги 1...5 мм.

В работе [4] проверялась адекватность математической модели (1) для более широкого диапазона сварочных токов (50...300 А). Установлено, что модель адекватна для значений тока 50...150 А. При токах, больше 150 А, рассчитанные с помощью модели значения интенсивности существенно расходятся с измеренными.

Синтезирована математическая модель на основе искусственной нейронной сети (ИНС) типа «многослойный персептрон», позволяющая оценивать длину сварочной дуги [4]. Входными данными для ИНС являются два параметра: сварочный ток и интенсивность излучения заданной спектральной линии атомов аргона. Модель построили для процесса сварки ТИГ меди в аргоне. Обучение ИНС осуществляли с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Проверка нейросетевой модели на экспериментальных данных показала ее адекватность для сварочных токов 50...300 А и длины дуги 2...5 мм.

Диагностика плазмы сварочной дуги представляет собой совокупность методов измерения параметров плазмы, характеризующих ее состояние. В статье [5] предложен метод диагностики плазмы сварочной дуги на основе спектра ее излучения. С помощью данного метода можно измерять температуру плазмы и концентрацию ее компонентов (атомы, ионы и электроны). Расчет температуры и концентрации осуществляли на основе синтезированной математической модели многокомпонентной плазмы. Математическая модель позволяет выполнять расчеты для любого химического состава плазмы сварочной дуги.

Важной задачей мониторинга сварочного процесса является регистрация участков сварного со-

единения, где образование дефектов наиболее вероятно. Метод диагностики сварных швов на основе спектрального анализа предполагает выделение в спектре сварочной дуги некоторых диагностических признаков, с помощью которых можно оценить качество сварного соединения.

Результаты экспериментальных исследований по разработке методик и систем мониторинга сварки на основе спектрального анализа излучения сварочной дуги приведены в публикациях [2, 6–13]. В настоящее время известны следующие типы диагностических параметров: интегральная интенсивность излучения в заданной полосе частот спектра [6–8]; интенсивность спектральной линии [2, 9]; температура плазмы сварочной дуги [8, 10, 11]; среднеквадратическое значение сигнала спектра [10]; интегральные параметры профилей спектральных линий [13].

В патенте [6] предложен способ мониторинга процесса сварки, позволяющий оценивать качество сварных соединений с помощью регистрации и анализа сигналов интегральной интенсивности излучения сварочной дуги в нескольких спектральных полосах. Интенсивности измеряют с помощью фотодетекторов с соответствующими полосами пропускания. Решение о дефектности сварного шва принимается путем сравнения измеренных сигналов интенсивности и сигналов, полученных для эталонных сварных швов с нормальной структурой.

В работах [7, 8] в качестве диагностических признаков используют значения интегральной интенсивности в нескольких спектральных полосах. Поскольку выбор спектральных полос не является тривиальной задачей, для указанной цели использовали методику автоматической селекции на основе экспериментальных данных. В этом случае экспериментальными данными являются две группы спектров излучения сварочной дуги. Первая группа получена для сварных швов с нормальной структурой, вторая — для сварных швов с дефектами.

Автоматическую селекцию осуществляли с помощью специально разработанного алгоритма, основанного на алгоритме селекции SFFS (Sequential Forward Floating Selection). Экспериментальное исследование показало эффективность предложенной методики выбора диагностических признаков при обнаружении дефектов, возникающих вследствие колебаний сварочного тока; изменения длины дуги; неравномерной подачи защитного газа; изменений ширины зазора между кромок.

В статье [8] разработана система мониторинга процесса сварки, в которой решение о наличии дефектов принимается с помощью ИНС типа «многослойный персептрон». Исходной информацией для мониторинга являются значения интен-



сивности набора спектральных полос, выбранных с помощью упомянутого алгоритма автоматической селекции.

Интенсивности спектральных линий в качестве диагностических признаков предложено использовать в статьях [2, 9]. В публикации [2] установлено, что по изменению интенсивности спектральных линий аргона в процессе сварки ТИГ с использованием сварочной проволоки можно обнаружить задержку подачи проволоки. Разработана система мониторинга сварки ТИГ стали [9], в которой для обнаружения дефектов сварных швов используют сигналы интенсивности спектральных линий железа и водорода. Как показали экспериментальные исследования [9], по изменению этих сигналов можно определить наличие в металле сварного шва вольфрамовых включений и водорода, обнаружить загрязнение песком поверхности металла и неравномерность подачи защитного газа.

Связь между температурой плазмы сварочной дуги и качеством сварных соединений исследована в работах [8, 10, 11]. Температуру плазмы вычисляли на основе значений интенсивности нескольких спектральных линий защитного газа. Экспериментальное исследование показало, что с помощью измерения температуры плазмы можно обнаружить такие дефекты сварных швов, как прожог и непровар, а также наличие факторов, негативно влияющих на качество сварных соединений (колебания сварочного тока; отклонение сварочной горелки от линии стыка; загрязнение поверхности металла машинным маслом).

В статье [10] в качестве диагностического признака предложено использовать среднеквадратическое значение сигнала спектра излучения сварочной дуги. Экспериментальное исследование показало, что при отсутствии существенных отклонений параметров сварки от номинальных значение этого признака неизменно на протяжении процесса сварки. Возникновение дефекта типа непровар сопровождается уменьшением среднеквадратического значения, а при прожоге возникает резкий скачок этого параметра. В случае превышения кромок или отклонения сварочной горелки от линии стыка в сигнале среднеквадратического значения фиксируются заметные колебания.

В работе [13] для обнаружения возмущающих воздействий, возникающих в процессе сварки МАГ, профили спектральных линий аппроксимировали функцией Лоренца, а ее параметры использовали как диагностические признаки. Применение интегральных параметров профилей спектральных линий обусловлено тем, что разрешающая способность быстродействующих цифровых спектрометров, используемых для измерений в масштабе реального времени, недостаточно

высокая для регистрации профилей отдельных линий, расположенных близко друг к другу.

За счет усреднения интенсивности излучения дискретными фоточувствительными элементами линейки спектрометра цифровой сигнал спектра вместо нескольких спектральных линий содержит один более широкий пик интенсивности. В результате подобных искажений уменьшается точность измерений интенсивности отдельных спектральных линий.

С этой точки зрения использование в качестве диагностических признаков интегральных параметров профилей спектральных линий более предпочтительно, чем самих интенсивностей линий. Экспериментальное исследование показало, что по изменению параметров функции Лоренца можно обнаружить колебания сварочного тока, загрязнение поверхности металла в месте сварки краской и грязью.

Разработана методика распознавания режима переноса металла по спектру излучения сварочной дуги для сварки МИГ/МАГ [14], осуществляемого с помощью вероятностного (байесовского) метода принятия решений. Первичными параметрами, на основе которых определяется режим переноса металла, служат статистические характеристики цифрового сигнала спектра. По результатам экспериментальной проверки методики погрешность распознавания режима переноса металла составила 5 %.

В процессе плазменной сварки высокоэнергетический поток плазмы пробивает в расплавленном металле сквозное отверстие, которое сразу же заполняется. В результате формируется сварной шов с полным проплавлением. Для предотвращения прожогов и недостаточного проплавления сварных швов необходимо контролировать процессы возникновения и исчезновения сквозного отверстия.

В работе [15] разработана методика спектрального анализа излучения сварочной дуги, с помощью которой можно обнаруживать моменты возникновения и исчезновения сквозного отверстия в процессе плазменной сварки. Информацию об этих моментах получают на основе анализа изменений интенсивности спектральных линий аргона.

Разработана система автоматического наведения на стык [3], компенсирующая поперечные отклонения сварочной горелки относительно линии прямолинейного стыка при сварке ТИГ без разделки кромок или с V-образной разделкой. Источником информации об отклонениях сварочной горелки является сигнал интегральной интенсивности излучения сварочной дуги либо интенсивности заданной спектральной линии защитного газа. При движении вдоль линии стыка отмечены колебания сигнала интенсивности. Отклонение



сварочной горелки от линии стыка вычисляется на основе амплитуды колебаний сигнала интенсивности и значений временных интервалов между его локальными минимумами и максимумами.

Группой немецких исследователей и инженеров разработан опытный образец системы автоматического регулирования импульсной сварки МИГ в аргоне на основе информации об излучении сварочной дуги [16]. Система регулирует поступающую в металл тепловую энергию в каждом импульсе сварочного тока.

При импульсной сварке после начала подачи импульса тока температура плазмы сварочной дуги увеличивается со скоростью в несколько миллионов градусов Кельвина в секунду. Импульс сварочного тока отключается, когда температура плазмы дуги достигает определенного значения. Для определения момента отключения импульса измеряют интегральные интенсивности излучения дуги I_M и I_T в двух соответствующих спектральных диапазонах Δ_M и Δ_T . Диапазон Δ_M (приблизительно 260...550 нм) перекрывает область наиболее интенсивных спектральных линий таких металлов, как цинк, магний, алюминий, медь, железо, а диапазон Δ_T (приблизительно 650...950 нм) — наиболее интенсивных спектральных линий защитного газа (аргона).

Интенсивности излучения дуги I_M и I_T измеряют с помощью двух фотодиодов. Разность измеренных интенсивностей $I_T - I_M$ монотонно уменьшается одновременно с повышением температуры плазмы после включения импульса сварочного тока. При снижении разности $I_T - I_M$ до заданного порога, соответствующего определенному максимальному значению температуры плазмы, система регулирования подает управляющий сигнал отключения импульса тока. В ходе испытаний разработанная система смогла обеспечить стабилизацию процесса сварки при значительных отклонениях ($\pm 30\%$) основного и импульсного токов от номинальных значений.

Таким образом, в настоящее время исследования и разработки, касающиеся применения спектрального анализа для автоматизации и мониторинга процесса сварки, находятся на начальном этапе своего развития. Предложенные диагностические признаки, выделенные в спектре излучения сварочной дуги, позволяют обнаруживать

дефекты сварного соединения и отклонения параметров сварочного процесса от номинальных значений. Однако еще не проведены исследования, подтверждающие высокую эффективность существующих решений, необходимую для их внедрения в промышленное производство.

1. Kim E. W., Allemand C., Eagar T. W. Visible light emissions during gas tungsten arc welding and its application to weld image improvement // *Weld. Res. Suppl.* — 1987. — № 12. — P. 369–377.
2. Kontrola procesu spawania TIG w oparciu o promieniowanie luku spawalniczego / M. S. Weglowski, Z. Mikno, M. Welcel, M. Kepinska // *Prz. spaw.* — 2007. — № 12. — S. 15–19.
3. Li P. J., Zhang Y. M. Analysis of an arc light mechanism and its application in sensing of the GTAW process // *Welding Research Supplement.* — 2000. — № 9. — P. 252–260.
4. Weglowski M. S. Investigation on the arc light spectrum in GTA welding // *J. of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.* — 2007. — 20, № 1-2. — P. 519–522.
5. Song Y., Li J. Spectral diagnostics of complex arc plasma // *China Welding.* — 1998. — 7, № 1. — P. 53–59.
6. Pat. 4446354 США, IC⁴ B 23 K 9/095. Optoelectronic weld evaluation system / Kearney F. W. — Publ. 1984.
7. Defect detection in arc-welding processes by means of the line-to-continuum method and feature selection / P. B. Garcia-Allende, J. Mirapeix, O. M. Conde et al. // *Sensors.* — 2009. — № 9. — P. 7753–7770.
8. Arc-welding spectroscopic monitoring based on feature selection and neural networks / P. B. Garcia-Allende, J. Mirapeix, O. M. Conde et al. // *Ibid.* — 2008. — № 8. — P. 6496–6506.
9. Bebiano D., Alfaro S. A weld defects detection system based on a spectrometer // *Ibid.* — 2009. — № 9. — P. 2851–2861.
10. Use of the plasma spectrum RMS signal for arc-welding diagnostics / J. Mirapeix, J. Fuentes, M. Davila et al. // *Ibid.* — 2009. — № 9. — P. 5263–5276.
11. Non-invasive spectroscopic system for non-destructive arc welding analysis / J. Mirapeix, A. Cobo, O. Conde et al. // *ECNDT.* — 2006.
12. Plasma spectroscopy analysis technique based on optimization algorithms and spectral synthesis for arc-welding quality assurance / J. Mirapeix, A. Cobo, D. A. Gonzalez, J. M. Lopez-Higuera // *Optics Express.* — 2007. — 15, № 4. — P. 1884–1897.
13. Weglowski M. S. Measurement of arc light spectrum in MAG welding method // *Metrology and measurement systems.* — 2009. — 16, № 1. — P. 143–159.
14. Bayesian decision-based pattern recognition on spectrum signal of metal transfer modes / S. Yun, L. Zhang, G. Han, J. Li // *China Welding.* — 2006. — 15, № 1. — P. 39–42.
15. Front side keyhole detection in plasma arc welding of stainless steel / Ch. Dong, L. Wu, H. Zhang, Y. Zhu et al. // *Ibid.* — 1999. — 8, № 2. — P. 102–110.
16. Echtzeit-spektralregler für impulschweisemaschinen / G. Heinz, F. Hofmann, H. Schopp, G. Gott // *Schweissen und Schneiden.* — 2009. — № 3. — S. 144–149.

Research activities in the field of spectral analysis of radiation of the welding arc are reviewed. The effect of the welding parameters on the spectrum of radiation of the welding arc, spectral diagnostics of the arc plasma, automation of the welding process based on spectral analysis of radiation of the welding arc, monitoring of the welding process, and automatic detection of defects in the weld are considered.

Поступила в редакцию 04.07.2011