

В.В. Звездин, И.Х. Исрафилов,  
А.Г. Григорьянц

## МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

*Изложены особенности формирования прецизионного сварного шва металлов с неизвестной кривизной. Показано, что качество технологического процесса сварки зависит не только от энергетических характеристик лазерного технологического комплекса, температуры сварочной ванны, но и от точности позиционирования фокуса лазерного излучения относительно сварного шва. Согласно результатам исследований, отклонение фокуса лазерного излучения от линии стыка свариваемых деталей не должна превышать 8...10 мкм. Поэтому оценкой качества технологического процесса сварки выступает точность позиционирования фокуса лазерного излучения. Это позволяет сформировать систему автоматизированного управления лазерным технологическим комплексом со стабилизацией заданного значения точности позиционирования лазерного луча относительно сварного шва.*

**E-mail:** saubanov@mail.ru

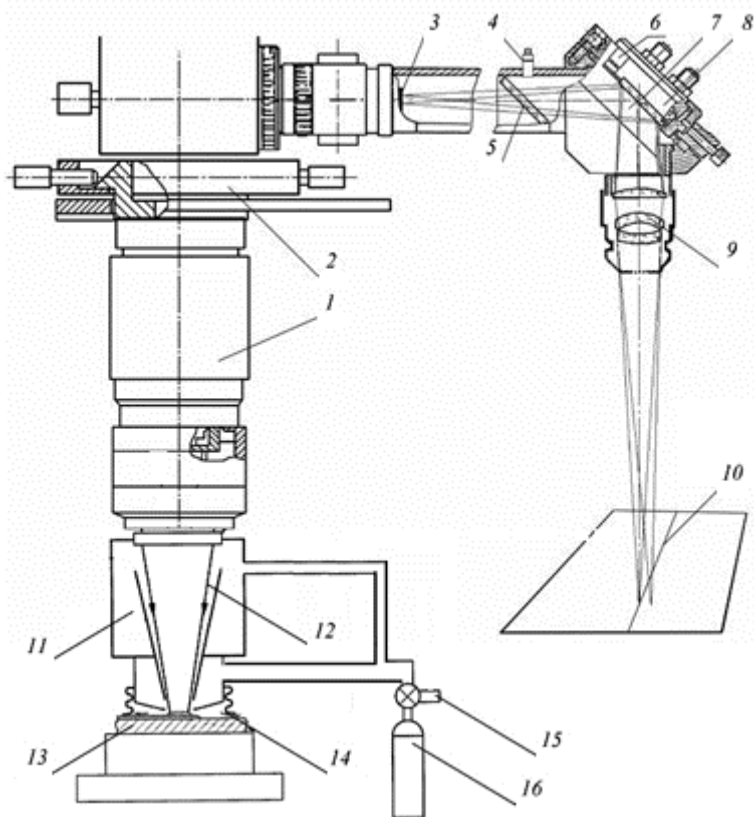
**Ключевые слова:** лазерная сварка, энергетические потери, газовая среда, качество технологического процесса, точность позиционирования лазерного луча.

**Введение.** Автоматизация процесса лазерной сварки деталей из металлов в машиностроении повышает эффективность технологического процесса (ТП). Наиболее целесообразно разрабатывать автоматизированную систему управления (АСУ) лазерными технологическими комплексами (ЛТК) со стабилизацией и оптимизацией энергетических и временных характеристик для получения требуемых выходных параметров ТП [1].

Современные измерительно-вычислительные средства в основном предназначены для создания гибких автоматизированных производственных модулей и многоцелевых информационно-измерительных систем автоматизации. Исследовательская работа связана с построением моделей, позволяющих изучать определенные свойства звеньев ЛТК. Применение моделей дает возможность использовать процедуры проектирования, которые основаны на применении банков адекватных моделей всевозможных технических звеньев комплекса [2].

**Результаты экспериментальных исследований.** В состав информационного обеспечения АСУ включаются модели отдельных динамических модулей, а также модели воздействующих на них сигналов и шумов. Это требует наличия адекватных математических моделей ТП на основе экспериментальных данных. Однако вследствие сложности физических процессов, протекающих при лазерной обра-

ботке материалов, они не дают полной картины происходящих явлений в зоне воздействия лазерного излучения (ЛИ) на металл. Кривизна сварного шва требует разработки конструкции следящего привода (рис. 1) [3].

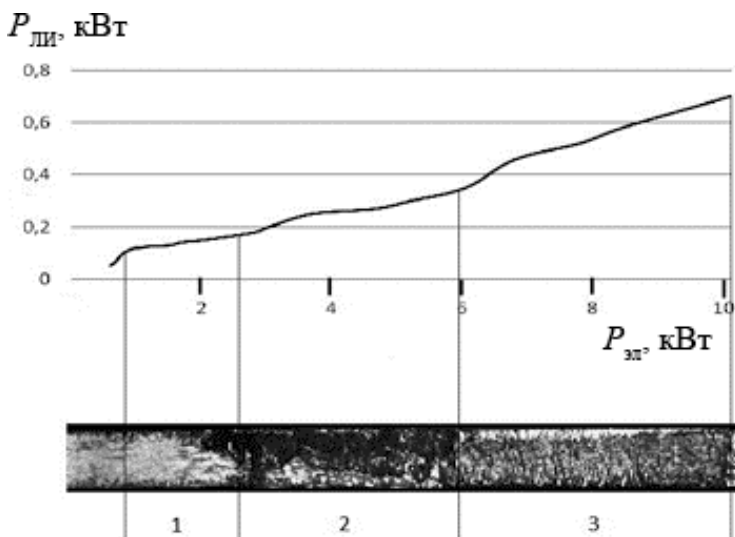


**Рис. 1. Конструкция следящего привода:**

1 — оптическая система; 2 — затвор; 3, 9 — фокусирующие линзы; 4, 6 — юстировочные винты; 5 — полупрозрачное зеркало; 7 — поворотное зеркало; 8 — элемент крепления; 10 — сварной шов; 11 — защитная камера; 12 — лазерное излучение; 13 — деталь; 14 — сильфон; 15 — вентиль; 16 — баллон с защитным газом

Для анализа вида ТП при различной плотности энергии ЛИ были проведены исследования стали 30X13. На рис. 2 приведено изменение режимов термической обработки в зависимости от мощности ЛИ.

Каждый режим термической обработки металлов характеризуется значением плотности энергии ЛИ и параметрами ТП, которые определяют показатели качества. За сигналы обратной связи АСУ ЛТК сварки металлов принимаются плотность энергии ЛИ, температура и точность позиционирования фокуса относительно стыка шва. Структура АСУ ЛТК представляет собой систему, которая характеризуется большим числом обратных связей и является нелинейной [4]. При обосновании выбора математической модели звеньев были



**Рис. 2. Изменение режимов термической обработки в зависимости от мощности ЛИ и электрической мощности:**

режимы: 1 — закалка; 2 — сварка; 3 — резание

приняты определенные допущения, позволяющие линеаризовать их передаточные функции. Расчеты и исследования свойств АСУ проводились для линеаризованной системы.

В соответствии с принятыми допущениями определены передаточные функции подсистем. Динамические процессы в элементах, входящих в нее, описываются дифференциальными уравнениями, на основании которых находятся передаточные функции. С помощью пакета прикладных программ получены переходные и частотные характеристики, определяющие качество САУ ЛТК.

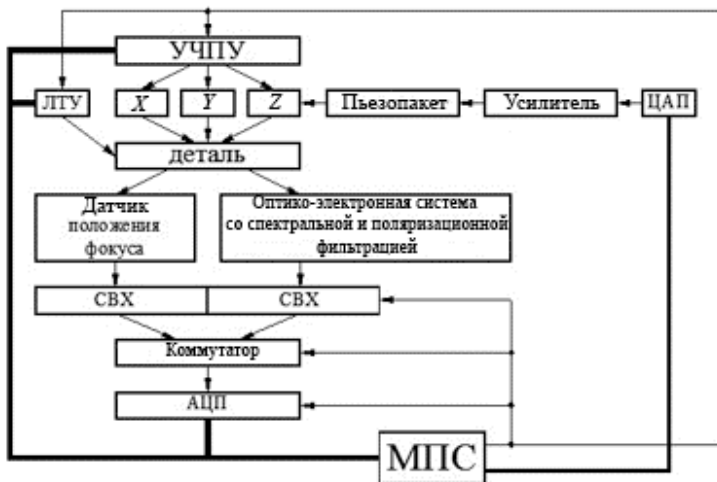
Анализ исследований в области разработки АСУ (рис. 3) показывает эффективность многоконтурных релейных систем с обратными связями по информативным параметрам, измеряемым в реальном времени для управления ЛТК. Анализ АСУ проводился по разработанным моделям в MathCAD.

Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид

$$Wr = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2^2 p^2 + 2T\zeta p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)},$$

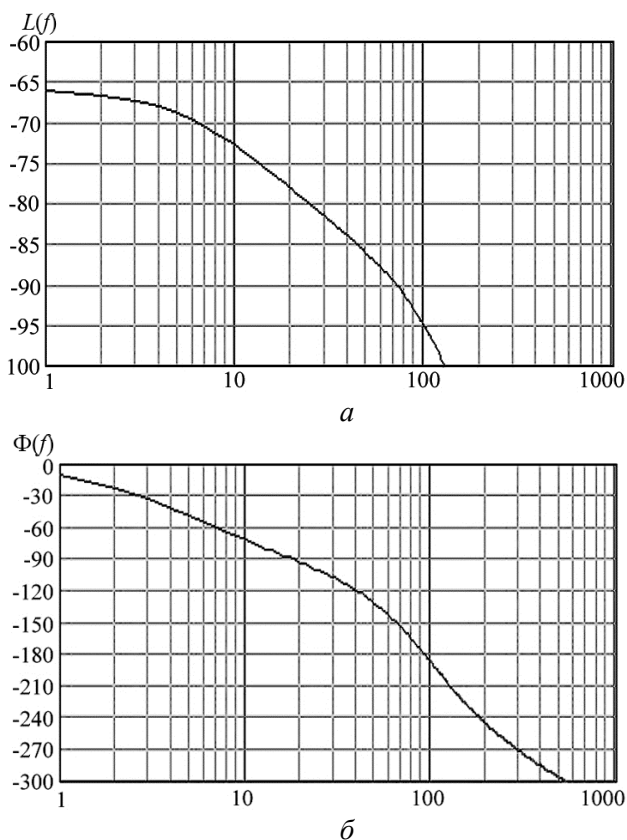
где  $K = \prod K_i = 0,0005$  — коэффициент усиления;  $T, T_1—T_4$  — постоянные времени звеньев системы управления;  $p$  — коэффициент;  $\zeta$  — коэффициент приближения.

Соответствующие логарифмические амплитудная и фазовая частотные характеристики приведены на рис. 4.



**Рис. 3. Схема АСУ ЛТК:**

УЧПУ — устройство числового программного управления; ЛТУ — лазерная технологическая установка; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; СВХ — схема выборки и хранения информации; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; МПС — микропроцессорная система



**Рис. 4. Логарифмические амплитудная (а) и фазовая (б) частотные характеристики**

Из приведенных зависимостей ясно, что замкнутая система также будет устойчива, запас устойчивости по амплитуде составляет около 80 дБ.

Анализ остальных контуров показывает, что все контуры АСУ являются минимально-фазовыми, устойчивыми, обладают большим запасом устойчивости по амплитуде (не менее 20 дБ).

Высокая концентрация теплоты в световом пятне лазера позволяет довести металлы не только до плавления, но и до кипения. Поэтому лазер можно использовать для сварки различных металлов, в том числе тугоплавких.

Один из распространенных процессов — конвекция под действием гравитационных сил в жидкости. Конвекция возникает и при нагреве металла сверху. Эффекты, связанные с движением жидкости вблизи поверхности раздела и вызванные зависимостью поверхностного натяжения от температуры или концентрации примесей, носят название эффектов Марангони.

Испарение вещества под действием сфокусированного луча используется во многих технологических операциях — сварке, сверлении, резании. В силу того, что давление паров материала является быстро растущей функцией температуры поверхности, испарение происходит также очень быстро.

Лазерная сварка характеризуется плотностью мощности  $E$  и длительностью воздействия излучения  $\tau$ . При  $E = 0,1 \dots 1,0$  МВт/см<sup>2</sup>,  $\tau > 10^{-2}$  с. Такой режим обеспечивается лазерами непрерывного действия. При  $E = 1,6 \dots 10,0$  МВт/см<sup>2</sup>, значение  $\tau < 10^{-3}$  с обеспечивается лазерами импульсно-периодического действия. Режим  $E = 0,1 \dots 1,0$  МВт/см<sup>2</sup>,  $\tau = 10^{-3} \dots 10^{-2}$  с реализуется лазерами импульсно-периодического действия и используется для сварки малых толщин.

Лазерную сварку молибдена и стали 45 проводили в защитной среде для обеспечения высоких свойств сварного соединения и предохранения шва от окисления. Защита поверхности шва от окисления осуществлялась смесью аргона с углекислым газом, подаваемым через специальное сопло. Корень шва с обратной стороны защищали аргоном. Соединяемые поверхности (рис. 5) подготовили под углом, расчет которого приведен в работе [5].

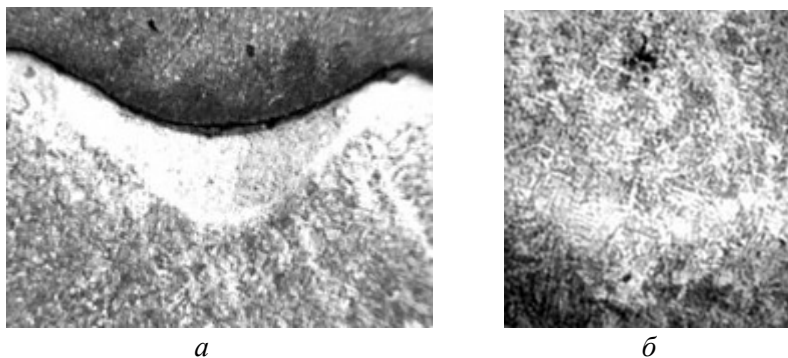


Рис. 5. Микроструктуры соединяемых поверхностей

Для повышения точности измерения температуры в условиях флуктуации параметров спектральных составляющих излучения применяем комбинированный метод, основанный на анализе спектральных сигналов и расчете температуры с поляризационной фильтрацией каждой составляющей спектра [6]. В плазменном факеле, представляющем собой источник линейчатого спектра, имеет место локальное термодинамическое равновесие. При этом распределение атомов по энергетическим уровням определяется законом Больцмана:

$$N_e = N_o \frac{g_e}{g_o} e^{-\frac{E_e}{kT}},$$

где  $N_o$  — число нейтральных атомов в  $1 \text{ см}^3$ ;  $N_e$  — число атомов, находящихся в возбужденном состоянии;  $g_e, g_o$  — статические веса возбужденного и нормального состояний;  $E_e$  — энергия возбуждения верхнего состояния;  $T$  — температура разряда;  $k$  — постоянная Больцмана.

Атомы из состояния с энергией  $E_e$  переходят самопроизвольно в нормальное или некоторое промежуточное состояние. При этом каждый атом излучает световой квант частотой  $\nu_{ei}$ . Интенсивность излучения

$$I = N_e A_{ei} h \nu_{ei}, \quad (1)$$

где  $A_{ei}$  — вероятность спонтанного излучения.

Подставляя значение  $N_e$  в (1), получаем следующее выражение для интенсивности излучения:

$$I = N_o \frac{g_e}{g_o} e^{-\frac{E_e}{kT}} h \nu_{ei} A_{ei}. \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, что интенсивность спектральных линий связана с температурой. Поэтому температура плазменного факела может быть однозначно определена, если интенсивность излучения измерена в абсолютных единицах.

Однако точное измерение абсолютных интенсивностей связано с большими экспериментальными трудностями. Поэтому измерение температуры факела можно проводить по изменению относительных интенсивностей спектральных линий.

Прологарифмируем выражение (2) и получим уравнение

$$\lg \frac{I}{P_{ei}} = b - a \frac{E_e}{T},$$

где  $b$  — постоянное слагаемое;  $P_{ei} = \frac{g_e}{g_o} A_{ei} h \nu_{ei}$ ,  $a = \frac{\lg e}{k} = 5040$ .

Тангенс угла наклона прямой  $\lg \frac{I}{P_{ei}} = f(E_e)$  к оси абсцисс определяет температуру.

**Выводы.** Экспериментальные исследования воздействия лазерного излучения на металлы показывают возможность оптимизации энергетических параметров ЛТК для сварки с получением требуемых показателей качества, что снижает энергозатраты. Разработанная АСУ ЛТК удовлетворяет предъявляемым требованиям и обеспечивает стабильные показатели качества сварки.

Большое значение для лазерной сварки имеет так называемый эффект автоколебаний. В процессе нагрева материала постоянным во времени потоком ЛИ, превышающим некоторое критическое значение, температура поверхности колеблется. Соответствующим подбором параметров временной структуры можно добиться полного устранения влияния плазменного факела на снижение проплавливающей способности лазерного излучения. Локальность сварки обеспечивает рациональное проектирование сварных деталей и минимальные остаточные деформации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки / Под ред. А.Г. Григорьянца. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 664 с.
2. Звездин В.В., Асанов А.З. А.С. № 1610706. Способ контроля качества лазерной обработки. Зарегистрирован 1.08.1990.
3. Позиционирование лазерного излучения относительно сварного шва как показатель качества технологического процесса / В.В. Звездин, А.В. Хаммаев, Р.Г. Загиров и др. // Вестник КГТУ им. Туполева, 2008. № 3. — С. 17—19.
4. Звездин В.В., Асанов А.З. А.С. №1610706. Система автоматического управления лазерным технологическим комплексом. Зарегистрирован 15.06.1990.
5. Пат. № 2415739. Россия, МПК В23К/26/40, В23К 9/23, И23Л 33/00—2009122958/02; Заявлено 27.12.2010; Оpubл. 10.04.2011; Бюл. № 10. — 2 с. Способ лазерной сварки деталей из разнородных металлов / В.В. Звездин, И.Х. Исрафилов, Д.Э. Велиев.

Статья поступила в редакцию 14.09.2012