

УДК 621.791.7

Анализ методов повышения эффективности и качества лазерной сварки

Есенгельдиев Нурхан Саламатович

Магистрант 2 курса

НАО Карагандинский Технический Университет

г. Караганда, Казахстан

Аннотация

В данной статье проводится анализ методов повышения эффективности и качества лазерной сварки. Повышение требований к сварным соединениям при производстве ответственных изделий выполненных из цветных и алюминиевых сплавов, поставило ряд проблем, поскольку комплекс физико-химических свойств создает неблагоприятные условия, для сварки и увеличивает вероятность образования ряда дефектов, ведущих к большому проценту отбраковки изделий. Одним из путей решения ряда проблем сварки плавлением, наряду с развитием дуговых способов, является применение высококонцентрированного источника энергии - лазерного луча, позволяющего повысить технологические возможности сварки. Мною предложена математическая модель для разработки производственной технологии лазерной сварки, позволяющая достигать наилучшей производительности сварки.

Ключевые слова: лазерная сварка; цветные металлы; малые толщины;

При дуговой сварке возникающая значительная усадка, а также высокий коэффициент линейного расширения приводят к существенным остаточным деформациям, что увеличивает вероятность искажения габаритных размеров конструкции (закручивание, укорочение, местное вспучивание), снижая ее технологичность. Это отрицательно сказывается на эксплуатационных показателях, и в общем недопустимо при сварке изделий из цветных металлов и алюминия, которые зачастую являются или декоративными элементами оформления или высокоответственными элементами сложных машин и механизмов.

Одним из путей решения ряда проблем сварки плавлением, наряду с развитием дуговых способов, является применение высококонцентрированного источника энергии - лазерного луча, позволяющего повысить технологические возможности сварки.

Сфокусированное лазерное излучение обладает высокой плотностью мощности (до 10^4 Вт/см²), что позволяет при сварке металлов вне вакуума получать сварные швы с глубоким проплавлением.

Как известно, развитие машиностроения и в особенности приборостроение, тесно связаны с новейшими методами получения неразборных соединений металлов с помощью сварки. Технологии лазерной сварки достаточно

просты в использовании и управлении процессом сварки. Наиболее эффективной чертой лазерной сварки является:

1. Высокая пространственно-временная локализованность излучения;
2. Отсутствие механического воздействия пучка лазера на объект обработки.

Источником тепловой энергии для активации поверхности соединяемых твердых материалов при сварке лазером служит энергия излучения, поглощаемая материалами в зоне воздействия лазерного пучка.

Лазерная сварка относится к термическому классу процессов сварки, для которых получение неразъемного соединения достигается местным расплавлением материалов, с последующей кристаллизацией расплава. При затвердевании расплава между атомами материалов устанавливаются прочные химические связи, соответствующие природе соединяемых материалов и типу их кристаллической решетки.

Источником тепловой энергии для активации поверхности соединяемых твердых материалов при сварке лазером служит энергия излучения, поглощаемая материалами в зоне воздействия лазерного пучка.

В настоящее время лазерную сварку, применяемую в приборе- и машиностроении, можно условно разделить на три вида: микросварка (соединение элементов с толщиной или глубиной проплавления менее 100 мкм), минисварка (глубина проплавления 0,1—1 мм) и макросварка (глубина проплавления более 1 мм).

Для первых двух видов сварки, получивших наибольшее распространение в промышленности, используют преимущественно импульсные лазеры с чрезвычайно удачным сочетанием свойств излучения, необходимых для осуществления локальной сварки. Для получения литой зоны с заданными размерами требуется определенная энергия. Чем выше плотность мощности пучка в зоне нагрева, тем меньше необходимо времени для ввода этой энергии и расплавления требуемого объема металла, и тем меньше размеры зоны термического влияния (ЗТВ). Сочетание коротких импульсов излучения с высокой концентрацией энергии в малом пятне облучения — большие преимущества лазерной импульсной сварки, особенно при соединении легко деформируемых деталей. Для обеспечения технической чистоты импульсную сварку чаще всего осуществляют без значительного перегрева материала, т. е. исключая его интенсивное испарение. В этом случае передача теплоты в глубь свариваемых деталей происходит в основном за счет теплопроводности (тепло-проводностный режим сварки).

Указанные положительные стороны технологического процесса сварки позволяют использовать эту технологию при различных особо ответственных операциях, не связанные со сваркой и резкой, но и скрайбированием, поверхностным упрочнением и другие операции. Причем указанные операции могут осуществляться не только с черными металлами, но и так-же на легко деформируемых изделиях и деталях, в том числе и вблизи теплочувствительных элементов.

Однако, при использовании лазерной сварки существует и ряд недостатков, среди них ограничение мощности лазерного излучения при низком КПД лазерного нагрева металла значительно сужают их технологическое применение и значительно препятствует использованию этой технологии.

Для начала определения методов повышения эффективности необходимо определить нестабильность режима сварки. Наиболее частая причина нестабильности режимов лазерной сварки происходит из-за неравномерности температуры свариваемых поверхностей материалов.

При анализе множества лабораторных испытаний было установлено, что при повышении температуры поверхности материала T до $T > T_k$ вызывает сильнейший локальный перегрев сварочной ванны, а снижение температуры поверхности материала T до $T < T_k$ - уменьшает глубину проплавления материалов.

Для анализа источников колебания температуры поверхности свариваемых материалов, нами предлагается следующая формула (1):

$$T = 2E_{л}(1 - R) \sqrt{\frac{a}{\pi^3 \tau k r_0^2}} \quad (1)$$

Где, $E_{л}$ – энергия излучения лазерного луча, Дж;

R – коэффициент отражения;

τ – длительность излучения лазерного луча на поверхность материала;

r_0 - радиус светового пятна от лазерного луча;

a – температуропроводность свариваемого материала.

Представленное уравнение (1) показывает зависимость от максимальной температуры нагрева поверхности материала, от равномерно-распределенного источника тепловыделения, с учетом его оптических характеристик.

Далее проведем исследование изменения максимальной температуры поверхности материала ΔT , с учетом постоянно изменяющихся параметров сварки лазерным лучом (2):

$$\Delta T = \left| \frac{\Delta T}{\Delta E_{л}} \right| \Delta E_{л} + \left| \frac{\Delta T}{\Delta r_0} \right| \Delta r_0 + \left| \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right| \Delta \tau + \left| \frac{\Delta T}{\Delta A} \right| \Delta A + \left| \frac{\Delta T}{\Delta k} \right| \Delta k + \left| \frac{\Delta T}{\Delta a} \right| \Delta a \quad (2)$$

Найдем частные производные первого порядка по соответствующим параметрам и представим в следующем виде (3):

$$\frac{\Delta T}{\Delta E_{л}} = 2A \sqrt{\frac{a}{\pi^3 \tau k r_0^2}};$$

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta T}{\Delta r_0} &= -4AE_{\text{л}} \sqrt{\frac{a}{\sqrt{\pi^3 \tau k r_0^3}}}; \\
\frac{\Delta T}{\Delta \tau} &= -AE_{\text{л}} \sqrt{\frac{a}{\sqrt{\pi^3 \tau^8 k r_0^2}}}; \\
\frac{\Delta T}{\Delta A} &= 2E_{\text{л}} \sqrt{\frac{a}{\sqrt{\pi^3 \tau^3 k r_0^2}}}; \\
\frac{\Delta T}{\Delta k} &= -2AE_{\text{л}} \sqrt{\frac{a}{\sqrt{\pi^3 \tau k^2 r_0^2}}}; \\
\frac{\Delta T}{\Delta a} &= \frac{AE_{\text{л}}}{\sqrt{\pi^3 \tau a r_0^2}}
\end{aligned} \tag{3}$$

Множество математических исследований проведенных по полученным данным имеет наибольшую зависимость от параметров R и r_0 .

Учитывая полученные данные, нами предложена математическая модель для разработки производственной технологии лазерной сварки, позволяющая достигать наилучшей производительности сварки.

Первым шагом в разработке промышленной технологии сварки служит оценка скорости сварки, для этого предлагаем использовать следующую формулу (4):

$$v = 2r_0 F (1 - \varepsilon) \tag{4}$$

Где, F – определенная частота повторения импульсов лазера;
 ε – коэффициент перекрытия точек.

Из уравнения (4), исходит вывод, что при увеличении скорости лазерной сварки, требуется уменьшение ε и пропорциональное увеличение r_0 и F .

Далее вводим в уравнение (4) вместо F вносим энергию излучения $E_{\text{л}}$, через выражение (5):

$$F = \frac{P_{\text{ср}}}{E_{\text{л}}} \tag{5}$$

Где, $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность импульса.

Тогда, получим уравнения для скорости сварки (6):

$$v = \left| \frac{2P_{\text{ср}}(1-R)(1-\varepsilon)}{(\pi k \tau T_k)} \right| \left(2 \sqrt{\frac{a\tau}{r_0}} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right) \tag{6}$$

Следовательно, для регулирования скорости сварки лазерным лучом в режиме пульсации, подобный режим сварки преимущественно используется

при сварке тонких пластин или пластин из разнородных материалов, необходимо регулировать энергию импульса $E_{л}$, а так изменять по уравнению (6) мощность излучения и снижать коэффициент отражения поверхности.

Таким образом, согласно полученной нами математической модели регулирования параметров лазерной сварки в условиях действующих предприятий, необходимо строго отслеживать радиус пятна до сотых долей мм, при одновременном снижении энергозатрат и увеличении количества импульсов.

Однако, существует существенная проблема влияния плазменных образований во время сварки как цветных металлов так и металлов черных. Указанные образования имеют существенное влияние на основные процессы, происходящие во время лазерной сварки. Существует предположение, что низкая эффективность использования энергии при обработке мощным лазерным излучением в значительной мере обусловлена плазменными процессами, вызывающими поглощение и рассеяние излучения и, вследствие этого, снижение мощности и степени сосредоточенности теплового источника на поверхности материала.

Следует отметить, что почти при всех видах лазерной сварки, связанной с нагревом металла до плавления и последующего испарения, над обрабатываемой поверхностью присутствуют пары металла. Поэтому на начальной стадии образования плазменного факела следует рассматривать ионизацию с учетом концентрации частиц металлического пара, которые обладают низким потенциалом ионизации.

Ионизация вызывается быстрыми электродами, приобретающими энергию в результате поглощения фотонов. Электроны, обладающие достаточной энергией, могут вызвать ионизацию при столкновении с атомом. При этом появляются два свободных электрона с небольшой энергией. Процесс поглощения фотонов электронами и последующая ионизация при столкновениях с атомами повторяются. Описанный процесс приводит к лавинной ионизации, т. е. к возникновению плазменного факела.

В начальный период возникновения плазменного факела свободные электроны рассеиваются и при столкновениях с нейтральными атомами пара и газа отбирают энергию. Плазменный факел на стадии окончательного формирования уже характеризуется сильной ионизацией. Вследствие малости поглощения излучения оптического и инфракрасного диапазонов для заметной диссипации его энергии в области ограниченных размеров требуются очень высокие степени ионизации, т. е. высокие температуры.

Только при таких температурах в плазме будет выделяться достаточное для ее поддержания количество энергии. В этих условиях поглощение энергии лазерного излучения будет осуществляться при столкновениях электронов с положительными ионами, а не с нейтральными атомами, как это было в начальный период ионизации. При степени ионизации, превышающей несколько процентов, рассеяние электронов на ионах намного превышает рассеяние на атомах.

Наилучшим образом осуществляется стабилизация оптического разряда в сфокусированном лазерном излучении потоком газа, направленным по лучу.

При заданной мощности лазерного излучения фронт разряда будет располагаться на различных расстояниях от фокуса в зависимости от скорости потока газа, а именно в таком сечении луча, когда плотность мощности излучения обеспечивает скорость распространения фронта разряда, равную скорости набегающего потока газа.

Мощность лазерного излучения, необходимая для поддержания оптического разряда, зависит от давления газа. С повышением давления газа возрастает коэффициент поглощения и, следовательно, увеличивается тепловыделение, определяемое произведением плотности мощности лазерного излучения на коэффициент поглощения. Поэтому для компенсации потерь теплопроводности, необходимой для поддержания оптического разряда, при более высоких давлениях газа достаточны меньшие плотности мощности.

Образование лазерной плазмы приводит к существенному изменению оптических свойств среды, в которой распространяется лазерное излучение. Обычно исследователи связывают это изменение оптических свойств с изменением расходимости светового пучка. В определенных условиях эти явления могут приводить к уменьшению расходимости, т. е. к самофокусировке света. Обычно эффект самофокусировки уподобляется появлению диэлектрического волновода, созданного нелинейным изменением диэлектрической проницаемости [4].

При проникании лазерного излучения через плазму к фокусу плотность его мощности, с одной стороны, нарастает вследствие схождения фокусируемых лучей, с другой стороны — падает в результате поглощения. Ослабленный при прохождении через плазму луч сможет сформировать при определенных условиях еще один оптический разряд в том сечении конуса, где плотность мощности достигает критического значения. Если создать условия для исчезновения первоначальной волны горения, например при переходе из защитного газа аргона в окружающий воздух, то над поверхностью обрабатываемых деталей будет формироваться последовательность волн горения, которые перемещаются одна за другой в направлении источника излучения. Наблюдение таких волн затруднительно из-за яркости высокотемпературной плазмы и разогретых паров металла. Однако можно фиксировать образование оптического пробоя, сопровождаемое характерным хлопком.

Большой практический интерес представляет установление расхода защитного газа, подаваемого соосно лазерному излучению на обрабатываемую поверхность таким образом, чтобы плазма непрерывного оптического разряда перемещалась в область каустики сфокусированного лазерного луча. При этом температура газа, вышедшего из зоны поглощения, должна быть максимально высокой.

Результаты анализа показывают, что при изменении расхода газа температурное поле в газовом потоке существенно изменяется. При увеличении расхода защитного газа аргона зона поглощения излучения перемещается в направлении входа в канал вдоль оси лазерного излучения, причем максимальная температуры плазмы при этом увеличивается. Если температура газа, входящего в канал, превышает начальную температуру ионизации парог-

зовой смеси, заполняющей канал, то значения температуры получают скачок вследствие появления еще одной волны горения. При дальнейшем увеличении расхода газа оптический разряд формируется уже в канале, и над поверхностью свариваемых деталей отсутствует зона поглощения.

Полученные данные позволяют в каждом конкретном случае обработки лазерным излучением определить оптимальный расход газа в дополнительном потоке. Оптимальный расход обеспечивает перемещение области поглощения лазерного излучения в зону каустики фокусируемого луча, располагаемую или на поверхности обработки, или же с некоторым заглублением. Одновременно достигается минимальный осевой градиент температуры газа. Выполнение этих условий обеспечивает высокую эффективность использования энергии лазерного излучения и минимальные потери излучения в окружающую среду.

Данные положения нашли практическое применение при разработке нового процесса лазерной обработки с дополнительным газовым потоком.

Непрерывный оптический разряд, формируемый вблизи поверхности при воздействии на нее лазерного излучения, изменяет условия поглощения и фокусировки излучения. Световой луч при прохождении через неоднородную среду отклоняется в сторону увеличения диэлектрической проницаемости.

Рассмотрим два возможных случая распределения плотности электронов в плазме.

Плазма имеет ярко выраженное ядро, плотность электронов в котором постоянна и резко падает за его пределами. Этому случаю соответствует рефракция излучения в непрерывном оптическом разряде, имеющем малые размеры и расположенном вблизи каустики лазерного излучения. В этом случае угол преломления зависит только от угла падения лазерного луча на поверхность плазмы. рефракция в лазерной плазме возрастает по мере увеличения угла наклона лучей к поверхности плазмы. В однородной плазме это приводит к смещению фокальной плоскости излучения вдоль оси луча.

Границы плазмы размыты, плотность электронов плазмы распределена по нормальному закону. В этом случае лазерное излучение проходит через слой плазмы, имеющей неравномерное в радиальном направлении распределение показателя преломления. Из анализа утверждения следует, что плотность электронов на оси излучения максимальна, следовательно, диэлектрическая постоянная на оси принимает минимальное значение, тогда как в радиальном направлении к периферии значение диэлектрической постоянной возрастает до единицы.

В целом ряде случаев лазерная обработка связана с нагревом металла до высоких температур (плавление, кипение). Возникающий при этом металлический пар оказывает заметное воздействие на оптический разряд в газе. Общая постановка задачи об изменении оптических свойств среды при взаимодействии потока пара с непрерывным оптическим разрядом и ее решение представляют значительные трудности. Представляет интерес упрощенный

анализ влияния парового потока на рефракцию излучения лазера, имеющего первостепенное значение при его фокусировке.

Поглощение и рефракция лазерного излучения в непрерывном оптическом разряде, распространяющемся в защитном газе, сменяются поглощением и рефракцией света в эрозионном плазменном факеле, образованном паровым потоком в плазме. Наличие парового сгустка в плазме приводит к снижению эффективного потенциала ионизации и увеличению коэффициента поглощения излучения. Возрастание поглощательной способности в эрозионном плазменном факеле может приводить к значительному экранированию участка нагрева и проплавления металла от воздействия лазерного излучения. Переход от режима просветления плазмы к режиму развитого экранирования осуществляется за малый промежуток времени. Экранирование проплавления участка приводит к остановке процесса испарения.

Скорость разлета парового сгустка возрастает вследствие нагрева лазерным излучением. Эрозионный плазменный факел разлетается, мощность потока излучения, падающего на поверхность металла, возрастает до первоначального значения. В зоне высокой плотности мощности может опять возникнуть непрерывный оптический разряд. Таким образом, процесс проплавления материала является периодическим. Характерные времена экранирования и проплавления определяются теплофизическими свойствами материала и защитного газа, а также параметрами лазерного излучения.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что лазерное излучение сильно рефрагирует в непрерывном оптическом разряде. В процессе охлаждения плазмы паровым сгустком фокусировка светового пучка улучшается, однако возникновение эрозионного плазменного факела приводит к экранированию участка проплавления и остановке процесса испарения.

Научный руководитель

к.т.н. доцент Бартенев И.А.

Список использованных источников

1. Ф. Стельмах. М.: Энергия. Лазеры в технологии., 2015: 216 с.
2. М. Новицкий, Д. И. Юренкоп, Лазеры в электронной технологии и обработке материалов.: М: Машиностроение, 2014. 152 с.
3. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 2015. 295 с.