



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени Н.Э. БАУМАНА

# Учебное пособие

А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.М. Чирков

**ГИБРИДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ**

Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени Н.Э. БАУМАНА

**А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.М. Чирков**

**ГИБРИДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ**

*Рекомендовано учебно-методическим объединением вузов  
по образованию в области машиностроения и приборостроения  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов  
6514 «Машиностроительные технологии и оборудование»,  
специальность 1207 «Машины и технология высокоэффективных  
процессов обработки материалов»*

**Москва**

**Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана**

**2004**

УДК 621.791.7(075.8)  
ББК 34.441  
Г83

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. *В.А. Фролов*,  
д-р техн. наук, проф. *В.М. Неровный*

**Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Чирков А.М.**

Г83 Гибридные технологии лазерной сварки: Учебное пособие. –  
М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 52 с.: ил.

ISBN 5-7038-2614-4

В учебном пособии рассмотрены основы современных технологий гибридных методов лазерной сварки, а также основные технологические недостатки лазерной сварки. Представлены примеры практического применения технологии гибридных методов лазерной сварки.

Для студентов старших курсов, обучающихся по специальности «Машины и технология высокоэффективных процессов обработки материалов», и инженеров-технологов машиностроительных предприятий.

Ил. 39. Табл. 5. Библиогр. 7 назв.

УДК 621.791.7(075.8)

**ББК 34.441**

ISBN 5-7038-2614-4

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004

## ВВЕДЕНИЕ

Уникальные свойства лазерного излучения – высокая монохроматичность и когерентность, низкая расходимость позволили создать перспективный вид высококонцентрированного теплового источника энергии. Луч лазера, как сварочный источник энергии, открыл новые технологические возможности в теории и практике сварочных процессов. Лазер, в настоящее время, является единственным доступным сварочным источником энергии, который при атмосферных условиях позволяет получить плотности мощности более  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, реализующие режим глубокого проплавления.

Любое сравнение лазерной сварки с другими методами является достаточно условным, поскольку каждый метод сварки, имеет свои определенные преимущества и недостатки, которые определяют области оптимального технико-экономического применения.

Лазерная сварка в процессе своего научно-технического развития получила свое дальнейшее развитие в виде создания гибридных методов сварки – двухлучевой лазерной, лазерно-дуговой, лазерно-индукционной, лазерно-плазменной, лазерно-светолучевой, которые находят все большее применение в промышленности вследствие своей высокой технико-экономической эффективности.

Соединение различных методов сварки с лазерной, в единый технологический сварочный процесс, позволяет нивелировать недостатки каждого метода сварки и получить новое качество в виде функции расширения технологических возможностей.

В настоящее время лазеры являются стандартным технологическим оборудованием многих промышленных предприятий, поэтому знание основных технологических возможностей, экономической эффективности, областей практического применения лазерной и гибридных лазерных методов сварки является неременным условием образовательного уровня современного инженера-технолога по сварочным технологиям.

В данном учебном пособии обобщен теоретический и практический опыт гибридных способов лазерной сварки конструкционных материалов, произведен сравнительный количественный и качественный технико-экономический анализ гибридных способов лазерной сварки.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Лазерная сварка, обладая определенными преимуществами перед известными классическими методами сварки, в то же время, как и любой другой метод сварки, имеет недостатки, которые, в большинстве своем, обусловлены физикой взаимодействия лазерного излучения с веществом или являются логическим следствием ее преимуществ.

### 1.1. Поглощение лазерного излучения обрабатываемой поверхностью

Поглощательная способность –  $A$  обрабатываемой лазерным излучением поверхности зависит от длины волны лазерного излучения, температуры и оптических свойств поверхности вполне определенными для каждого металла. На рис. 1 показана зависимость поглощательной способности стали и алюминия, как функция длины волны лазерного излучения, при комнатной температуре. Поглощательная способность алюминия составляет около 2%, при применении  $\text{CO}_2$ -лазера с длиной волны 10,6 мкм, и 5%-10% при применении твердотельного лазера  $\lambda = 1,06$  мкм. Что касается металлических материалов, то лазерное излучение поглощается в скин-слое и через электроны, в области проводимости, энергия передается в глубь металла, то есть передача тепла металлу происходит за счет столкновений электронов, поглотивших лазерное излучение, с кристаллической решеткой и другими электронами. Этот процесс развивается на глубине  $0,1 \div 1$  мкм, за промежуток времени примерно равный  $10^{-11}$  сек. Постепенно температура электронного газа и кристаллической решетки выравниваются и примерно через  $10^{-9} \div 10^{-8}$  сек можно говорить об общей температуре металла в зоне обработки.

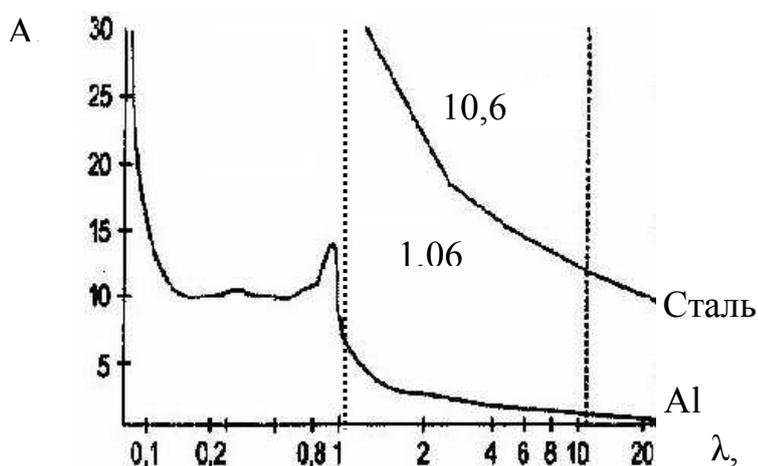


Рис. 1. Зависимость поглощательной способности от длины волны лазерного излучения

Для алюминия это означает, что при применении твердотельного лазера поглощательная способность выше, чем для стали.

Низкий уровень поглощательной способности обрабатываемой поверхности и ее зависимость от длины волны лазерного излучения является существенным недостатком технологии лазерной обработки, так как приводят к значительному повышению порогового значения уровня плотности мощности, необходимой для обработки материала.

Низкие значения поглотательной способности металлов делают, на первый взгляд, малоэффективным использование мощных лазеров в металлообработке. Однако поглотательная способность металла может быть существенно повышена специальной обработкой поверхности – увеличением исходной шероховатости, нанесением специальных покрытий, созданием окисной пленки, а также с использованием физических методов.

Технологические операции изменения шероховатости поверхности, нанесения специальных покрытий увеличивают длительность технологических циклов и трудоемки, поэтому желательна замена или исключение из технологического цикла изготовления детали данных техпроцессов.

Более целесообразным является воздействие на обрабатываемую поверхность дополнительными источниками нагрева, которые производятся одновременно (параллельно) с лазерной сваркой и, изменяя физико-оптические свойства поверхности, значительно увеличивают поглотательную способность обрабатываемой поверхности.

Поглотательная способность неокисленной металлической поверхности лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 10,6$  мкм описывается уравнением Хагена-Рубенса.

$$A = 112,2 (\sigma^{-1})^{1/2} \quad (1)$$

где,  $\sigma$  – удельная электропроводность металла,  $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ ;

$A$  – поглотательная способность (коэффициент поглощения) металла.

Поскольку электропроводность металлов уменьшается при увеличении температуры, то, соответственно, возрастает и коэффициент поглощения. При переходе металла из твердого состояния в жидкое, число электронов проводимости на один атом металла, плотность металла, удельное сопротивление металла по постоянному току изменяются (рис. 2).

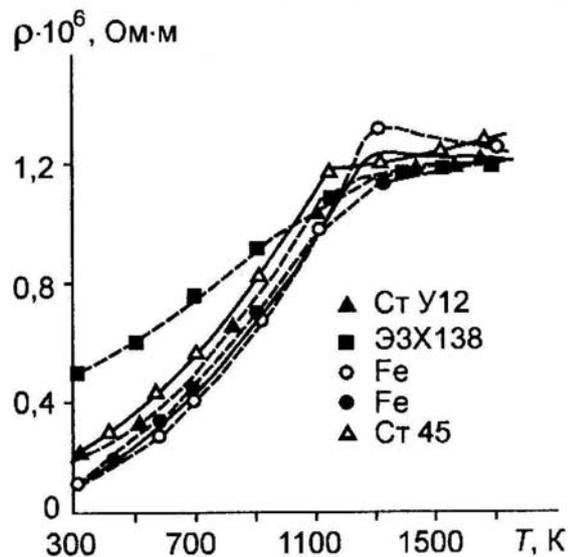


Рис. 2. Температурная зависимость удельного сопротивления для железа и сталей

Изменение данных физических величин приводит, в соответствии с законом Хагена-Рубенса, к повышению коэффициента поглощения в точке плавления металла (рис. 3).

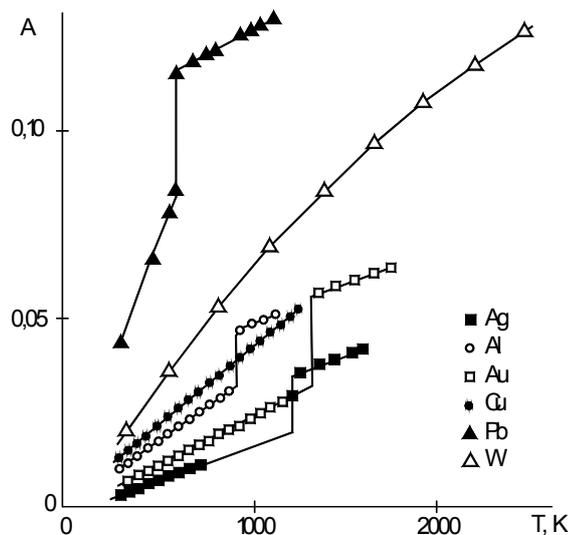


Рис. 3. Расчетная зависимость коэффициента поглощения чистых металлов от температуры

В качестве дополнительных источников воздействия, для изменения оптических свойств поверхности, может выступать электрическая дуга, струя плазмы, светолучевая обработка, которые, действуя одновременно (параллельно) с лазерным излучением, изменяют коэффициент поглощения обрабатываемой поверхности и одновременно участвуют в образовании и формировании сварного шва.

## 1.2. Термические циклы лазерной сварки

Существенное значение на свариваемость металлов оказывают термические сварочные циклы. Лазерная сварка обладает жестким термическим циклом. Скорость нагрева в сварном шве характеризуется значением  $1,4 \cdot 10^4$  град/с. Скорость нагрева в зоне термического влияния в интервале полиморфного превращения сталей составляет  $5 \cdot 10^3$  град/с., а скорость охлаждения  $5 \cdot 10^2$  град/с. Уменьшение жесткости термического цикла, в определенных случаях, может благоприятно сказываться на свариваемости.

Уменьшение жесткости сварочного термического цикла может быть реализовано одновременным наложением термического цикла лазерной сварки и менее жестких термических циклов других методов сварки, например, индукционной, плазменной, светолучевой, используя их в режиме предварительного или сопутствующего подогрева (рис. 4).

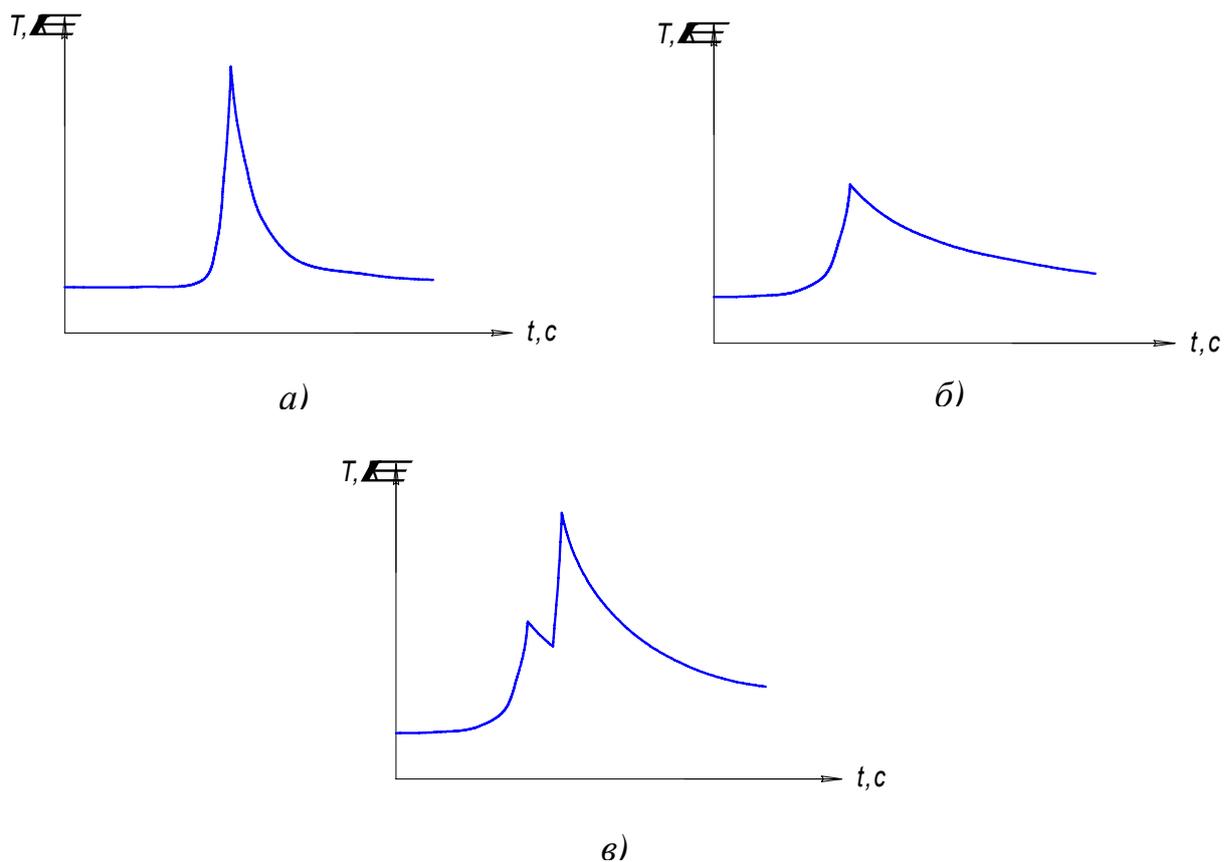


Рис. 4. Термические циклы различных методов сварки

- а) термический цикл лазерной сварки
- б) термический цикл индукционного подогрева
- в) термический цикл гибридной лазерно-индукционной сварки

Как видно (рис. 4в) жесткость термического цикла снижается при гибридной лазерно-индукционной сварке, что благоприятно сказывается, в отдельных случаях, на технологической прочности сварного соединения.

### 1.3. Процессы порообразования при лазерной сварке

Процесс порообразования относится к сложным физико-химическим явлениям и его развитие обусловлено не только свойствами исходного металла, но и параметрами сварки. Рассмотрим порообразование применительно к лазерной сварке алюминиевых сплавов. Одной из основных причин порообразования при сварке алюминия и его сплавов является водород, попадающий в металл сварочной ванны из основного и присадочного металла. Из-за высокого сродства расплавленного металла к водороду и "падения растворимости", которое имеет место во время кристаллизации алюминия, необходимо принять меры по предотвращению любого притока водорода в зону шва (рис. 5). Расплавленный алюминиевый сплав при температуре  $660^{\circ}\text{C}$  может растворить около  $0,7\text{см}^3/100\text{ г}$  водорода - то при температуре  $658^{\circ}\text{C}$ , как только он кристаллизовался,

только  $0,036 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . Одной из отличительных черт лазерной сварки является низкая погонная энергия, что означает, что для обратной диффузии водорода остается очень мало времени - ситуация, которая, в конечном счете, приводит к образованию водородных пор. С другой стороны, используя методы сварки в которых погонная энергия выше, сварочная ванна больше, больше время кристаллизации - что благоприятно сказывается на эвакуацию большего количества водорода и, соответственно уменьшение пористости.

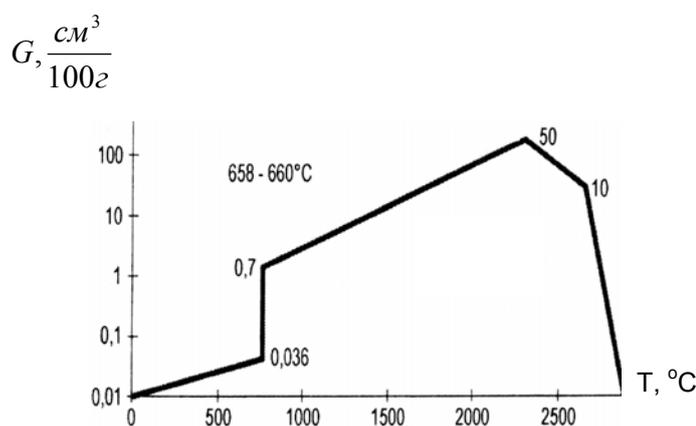


Рис. 5. Растворимость водорода в алюминии в зависимости от температуры где, G – растворимость водорода,  $\text{см}^3/100 \text{ г}$ .

Таким образом, уменьшение длительности существования жидкой фазы расплава сварочной ванны должно подавлять развитие зародышей пузырьков, а увеличение – способствовать их росту и, следовательно, эвакуации пузырьков из жидкой фазы сварочной ванны. Увеличение длительности существования сварочной ванны возможно за счет увеличения погонной энергии.

Снижением погонной энергии (ужесточением термического цикла сварки) можно уменьшить размер пор (суммарный объем несплошностей) за счет сокращения времени развития газовых пузырьков. Однако при этом давление водорода в порах будет повышенным из-за того, что большая часть влаги будет реагировать с уже закристаллизовавшимся металлом с выделением водорода в объем несплошностей.

Исследование лазерной сварки сплавов алюминия показало, что гибридная двухлучевая лазерная сварка позволяет уменьшить порообразование, за счёт снижения жесткости термического цикла.

#### 1.4. Гидродинамическая неустойчивость ванны расплава при высоких скоростях лазерной сварки

При определенных, высоких, скоростях лазерной сварки ( $V_{\text{св}} > 200 \text{ мм/с}$ ) качественное формирование швов нарушается в результате образования так называемых “горбов”, (“всплесков”).

Причины образования горбов следующие. При сварке со сквозным проплавлением существует множество факторов (возмущений), вызывающих нарушение качественного формирования шва. К ним относятся возмущения, обусловленные технологической наследственностью, определяемые химической и структурной неоднородностью металла, а также системными ошибками технологической подготовки производства (колебаниями толщины зазора, угла скоса кромок свариваемых деталей и др.). Технологические возмущения приводят к случайным изменениям кривизны жидкой фазы расплава металла шва и соответственно к изменению сил поверхностного натяжения, что вызывает перепад давлений в жидкой фазе поперечного сечения сварочной ванны, который приводит к торможению жидкой фазы металла части ванны шва. В месте торможения жидкой фазы увеличивается объем жидкого металла и при кристаллизации образуется “горб”.

Таким образом, жидкая фаза ванны расплава шва испытывает гидродинамическую неустойчивость, ведущую, на больших скоростях сварки, к образованию “горба”.

Использование дополнительных источников нагрева в виде второго, менее мощного луча, дуги или плазмы позволяет сглаживать образующиеся “горбы”.

### 1.5 Требования к геометрии сборки свариваемых деталей

Высокие значения коэффициента сосредоточенности лазерного сварочного источника энергии определяют минимальные объемы расплава сварочной ванны, а режим глубокого проплавления – высокое значение коэффициента формы шва. Вышеуказанные факторы предъявляют более высокие требования к точности геометрии сборки свариваемых деталей под сварку, по сравнению с аргоно-дуговой сваркой (АРДС).

Например, при сварке в стык, без присадки (рис. 6), конструкционных сталей толщиной  $H$ , требования предъявляемые к зазору в стыке –  $b$  и смещение кромок –  $\Delta H$  при лазерной сварке – ЛС являются более жесткими по сравнению с АРДС (таблица №1).

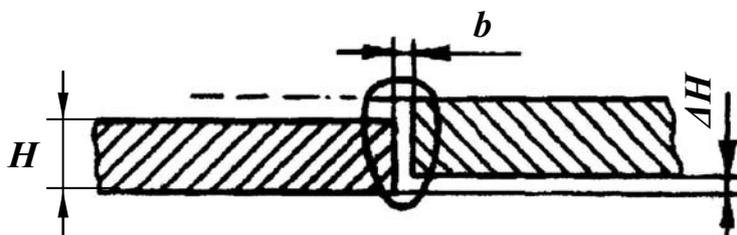


Рис. 6. Геометрия зазора и смещения свариваемых кромок при сварке встык

Таблица 1

Толщина металла, мм	Скорость сварки, мм/сек	Максимально допустимая величина зазора (b), мм	Максимально допустимое смещение кромок ( $\Delta H$ ), мм
0,8 – 1,5	5,5-22,2	0,12	0,1
	22,2-33,3	0,10	
1,5 – 3,0	5,5-22,2	0,15	0,15
	22,2-33,3	0,12	

Невыполнение требований по геометрии сборки свариваемых деталей при лазерной сварке может привести к утонению (ослаблению) шва, потере конструкционной прочности сварного соединения или к непровару корня шва.

Требования к точности геометрии сборки можно значительно снизить, если увеличить объем сварочной ванны и уменьшить значение коэффициента формы шва. Этого можно достичь, например, используя параллельно с лучом лазера электрическую дугу, которая, формируя сварочную ванну в режиме теплопроводности, значительно уменьшает коэффициент формы шва, то есть использовать гибридную технологию лазерно-дуговой сварки.

### **1.6 Требования к стабильности диаграммы направленности лазерного Излучения**

Стабильность диаграммы направленности лазерного излучения имеет исключительно важную роль в технологической воспроизводимости процесса лазерной сварки. Высокое значение коэффициента формы шва и минимизация диаметра пятна, предъявляют жесткие требования к стабильности диаграммы направленности лазерного излучения, то есть к смещению оптической оси лазерного излучения. Особенно значительно данный эффект может сказываться если сварочный пост находится на расстоянии нескольких десятков метров от излучателя лазера.

Изменение положения центра диаграммы направленности в пространстве приводит к смещению энергетического центра сварочного источника тепла, и, как следствие, к смещению геометрии формирования шва и особенно корня шва (рис. 7), что может привести к непровару корня шва.

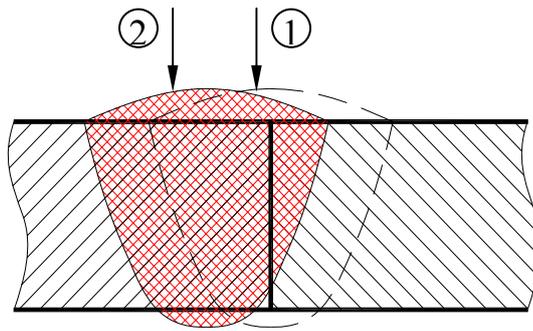


Рис. 7. Изменение геометрии формирования шва в результате нестабильности диаграммы направленности лазерного излучения

- 1 – исходное положение диаграммы направленности
- 2 – смещенное положение диаграммы направленности

Стабильность диаграммы направленности определяется не только лазером, но и системой транспортировки и фокусировки лазерного излучения.

### 1.7 Технико-экономическая эффективность лазерной сварки

При выборе вида сварочного источника энергии, для сварки конкретных изделий, необходимо учитывать, энергетическую и экономическую эффективность сварочного источника, а также качество и надежность полученных сварных соединений.

Оценку технико-экономической эффективности различных методов сварки производят по многим параметрам, в том числе по значению удельной плотности энергии –  $W_E$ , необходимой для формирования шва (рис. 8).

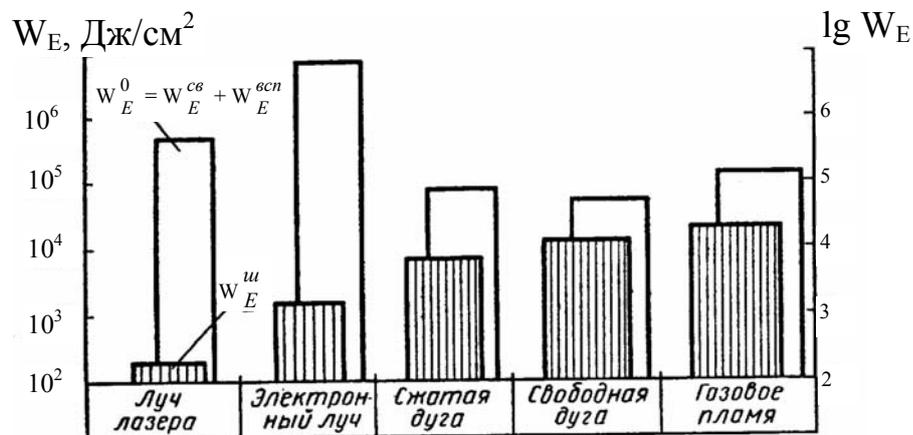


Рис. 8. Энергетическая эффективность сварочных источников энергии

Где,

$W_E^u$  – плотность энергии, необходимая для образования шва;

$W_E^{cs}$  – плотность энергии сварочного источника;

$W_E^{scn}$  – плотность энергии вспомогательных систем;

$W_E^0$  – суммарная плотность энергии при сварке

Сравнение критериев  $W_E^u$ , для шва при однопроводной сварке конструкционной стали, показывает, что переход от сварки концентрированным источником энергии (например, газовым пламенем  $W_E^u \approx 200\div 400$  Дж/мм<sup>2</sup>) к высококонцентрированным в значительной мере снижает значение  $W_E^u$ .

В то же время общие затраты удельной энергии  $W_E^0$ , в которых учитывается полное КПД источника энергии, сервисное энергообеспечение (например, вакуумирование для электронно-лучевой сварки) для высококонцентрированных источников энергии выше по сравнению с концентрированными источниками энергии.

Стоимость одного ватта энергии концентрированного источника энергии, например светолучевой сварки, составляет примерно на порядок ниже стоимости одного ватта высококонцентрированного сварочного источника энергии. Поэтому объединение различных видов сварки в единый технологический процесс позволяет снизить стоимость одного Вт энергии сварочного источника энергии.

Таким образом, соединение лазерной сварки с другими источниками нагрева, в единый технологический процесс, позволяет в значительной мере нивелировать присущие каждому из методов сварки недостатки и, одновременно, получить новое качество, в виде расширения технологических возможностей. В частности, повысить качество сварных соединений и значение верхнего предела скорости сварки, а так же снизить дефектообразование при сварке и себестоимость сварки одного погонного метра шва,.

Наиболее разработанными являются процессы гибридных технологий двухлучевой лазерной сварки, лазерно-дуговой, лазерно-индукционной, лазерно-плазменной и лазерно-светолучевой.

## 2. ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА

К настоящему времени дуговой разряд, как один из самых распространенных и дешевых видов сварочных источников, наталкивается в своем дальнейшем развитии на существенные трудности, связанные с недостаточной концентрацией энергии в электродуговой плазме и неустойчивостью горения дуги при высоких скоростях сварки. В связи с этим дуговой разряд, как технологический инструмент для реализации процессов сварки и металлообработки, не удовлетворяет современным требованиям промышленности в отношении производительности и качества сварных соединений. Лазерная сварка, как было сказано, также имеет определенные недостатки. Гибридная лазерно-дуговая сварка позволяет в значительной мере нивелировать вышеперечисленные недостатки, присущие каждому из указанных методов сварки.

Гибридная лазерно-дуговая сварка – это такой метод сварки, при котором формирование сварочной ванны происходит при одновременном действии лазерного излучения и сварочной дуги.

Процесс лазерно-дуговой сварки металлов может быть реализован по двум схемам – в первой схеме луч лазера и дуга действуют с разных сторон (рис. 9,а), во второй схеме воздействие дуги и луча осуществляется с одной стороны, по отношению к направлению сварки и нормали к поверхности металла (рис. 9,б). При совместном действии дуги и лазерного луча с одной стороны детали основанием дуги служит образованная лазерным лучом приповерхностная плазма, что способствует повышению скорости сварки, так как дуга, подплавляя поверхностный слой металла, способствует повышению коэффициента поглощения лазерного излучения. Выбор той или иной схемы лазерно-дугового процесса определяется, прежде всего, конструктивными особенностями сварного узла. Схема (а) может быть использована при сварке листовых материалов, а при сварке изделий типа обечайки предпочтительнее схема ( б ).

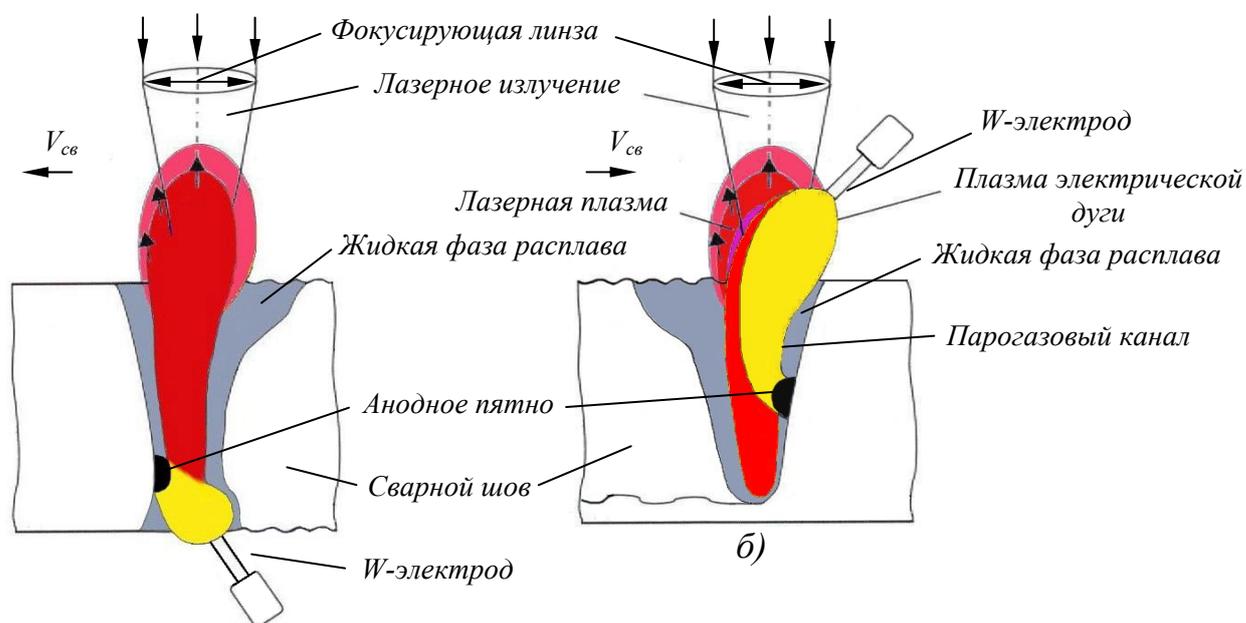


Рис. 9а) Геометрические схемы реализации процесса лазерно-дуговой сварки

Процесс лазерно-дуговой сварки может осуществляться неплавящимся или плавящимся электродом. При использовании неплавящегося электрода дуга зажигается впереди по ходу сварки. Дуга подогревает металл и расплавляет его верхний слой, а лазерный луч осуществляет глубокое проплавление. В случае использования плавящегося электрода электрическую дугу зажигают позади сфокусированного лазерного излучения, которое проплавляет только соприкасающиеся части металла, например в V-образной разделке его кромки, а заплатавание скоса кромок осуществляет электрическая дуга с расходуемым электродом.

## 2.1. Основные энергетические характеристики процесса лазерно-дуговой сварки

Поскольку лазерно-дуговая сварка осуществляется двумя источниками нагрева, необходимо рассмотреть энергетический баланс процессов лазерной, дуговой и лазерно-дуговой сварки.

При лазерной сварке часть энергии лазерного луча -  $Q$  поглощается облаком плазмы (факелом) -  $Q_{\phi}^n$ , отражается от металлической поверхности -  $Q_0^n$ , расходуется на испарение -  $Q_u^n$  и образование сварочной ванны -  $Q_{\sigma}^n$ , а также отводится в металл теплопроводностью -  $Q_T^n$ . При этом баланс энергии при лазерной сварке определяется следующим образом:

$$Q = Q_{\phi}^n + Q_0^n + Q_u^n + Q_{\sigma}^n + Q_T^n \quad (2)$$

Дуга рассматривается как квазиравновесная система, состоящая из трех источников энергии – катодного  $W_k$ , анодного  $W_a$  и столба дуги  $W_{ст}$ . При этом теплота, выделяющаяся в катодной и анодной зонах, затрачивается на нагрев, плавление и испарение соответствующих электродов.

Рассмотрим баланс тепла при сварке неплавящимся  $W$  - электродом на прямой полярности. В первом приближении полная электрическая мощность дуги  $U_d I$ , складывающаяся из тепла, выделяемого на аноде  $W_a$ , катоде  $W_k$  и в столбе дуги  $W_{ст}$ , расходуется на подогрев, плавление и испарение электрода  $Q_{\sigma}^d$ , отводится в свариваемый металл (анод) теплопроводностью  $Q_T^d$ , затрачивается на образование сварочной ванны  $Q_B^d$  и на потери тепла за счет радиации  $Q_P^d$ . Пренебрегая радиационными потерями в анодной и катодной зонах, можно считать, что  $W_a \approx Q_T^d + Q_B^d$ , а  $W_k = Q_{\sigma}^d$ . В общем виде получаем следующее выражение:

$$U_d I = W_a + W_{ст} + W_k = Q_T^d + Q_B^d + Q_{\sigma}^d + Q_P^d \quad (3)$$

Тепло от двух источников энергии должно суммироваться, однако, как показали экспериментальные исследования, тепловой баланс при лазерно-дуговой сварке не является суммой балансов тепла отдельных источников (таблица №2).

Таблица 2

Источник нагрева	P, Вт	U <sub>д</sub> , В	I, А	U <sub>д</sub> I+P, Вт	V <sub>св</sub> , мм/с	S, мм <sup>2</sup>
Лазерный	950	—	—	—	31,3,	0,809
Дуговой	—	24	50	1200	31,3	0,756
Лазерно-дуговой	950	20	50	1950	31,3	1,988

Количество тепла, затраченное на образование сварочной ванны, пропорционально площади поперечного сечения шва S. Так как площадь поперечного сечения шва при лазерно-дуговой сварке превышает сумму площадей сечения швов, выполненных, отдельно дуговой и лазерной сваркой, то и количество тепла, затраченное при этих процессах на проплавление металла, различно. Таким образом, взаимное влияние источников приводит к повышению эффективности сварочного процесса. Баланс тепла при лазерно-дуговой сварке необходимо рассматривать как от единого лазерно-дугового источника суммарной мощностью P+U<sub>д</sub>I.

$$P+U_{д}I = Q_{В}^{ЛД} + Q_{Т}^{ЛД} + Q_{Э}^{ЛД} + Q_{И}^{ЛД} + Q_{0}^{ЛД} + Q_{Ф}^{ЛД} + Q_{Р}^{ЛД} \quad (4)$$

Основными энергетическими характеристиками процесса лазерной сварки плавлением являются эффективный -  $\eta_{эф}$ , термический -  $\eta_{т}$  и полный -  $\eta$  тепловой КПД.

При лазерно-дуговой сварке эффективный КПД -  $\eta_{эф}$  процесса определяется отношением суммы потерь при сварке к общей введённой мощности:

$$\eta_{эф} = \frac{Q_{В}^{ЛД} + Q_{Т}^{ЛД} + Q_{И}^{ЛД}}{P + U_{д}I} \quad (5)$$

Термический КПД -  $\eta_{т}$  определяет долю энергии, введенной в материал, затраченную на плавление:

$$\eta_{т} = \frac{Q_{В}^{ЛД}}{Q_{В}^{ЛД} + Q_{Т}^{ЛД} + Q_{И}^{ЛД}} \quad (6)$$

Полный тепловой КПД представляет собой произведение термического и эффективного

$$\eta = \eta_{эф} \cdot \eta_{т} = \frac{Q_{В}^{ЛД}}{P + U_{д}I} \quad (7)$$

и наиболее полно информирует об эффективности процесса.

Рассмотрим влияние параметров режима сварки на полный тепловой КПД. Из закона сохранения энергии следует естественное ограничение сверху  $\eta < \max[\eta^{Л} + \eta^{Д}]$ , где  $\eta^{Л}$ ,  $\eta^{Д}$  – полный КПД лазерной и дуговой сварки. С другой стороны, очевидно, что  $\eta \geq \min[\eta^{Л} + \eta^{Д}]$ . Эти ограничения на полный КПД процесса лазерно-дуговой сварки соблюдаются во всем диапазоне изменения параметров режимов.

Величина  $\eta$  определяется степенью влияния лазерного и дугового источника друг на друга, что в свою очередь зависит от соотношения мощностей источников, их взаимной геометрической ориентации и других параметров сварки.

При воздействии лазерного излучения и дуги в процессе сварки по второй геометрической схеме, КПД выше для случая, когда дуга располагается впереди по ходу движения лазерного луча (таблица 3).

Таблица 3

Геометрическое положение источников	P, Вт	I, А	$V_c$ , мм/с	$S_2$ , мм <sup>2</sup>	$\eta$
Дуга впереди луча	950	100	40	2,370	0,32
Дуга сзади луча	950	100	40	1,856	0,25

Поэтому сварку без присадки рекомендуется проводить с расположением сварочного W-электрода впереди луча, поскольку такой процесс более эффективен.

Наибольший интерес представляет характер изменения эффективности нагрева в зависимости от соотношения мощностей лазерного и дугового источника.

Исследования, проведенные на лазерной установке мощностью до 1000 Вт и установке для аргонно-дуговой сварки W-электродом в диапазоне токов 15...120 А, показали, что в указанном диапазоне токов дуги с увеличением мощности лазерного луча полный КПД лазерно-дуговой сварки повышается до максимальных значений. Этот факт указывает на то, что решающая роль в эффективном тепловложении принадлежит энергии лазерного излучения.

В зависимости от тока дуги, при фиксированном значении мощности лазера, полный тепловой КПД для малых токов остается приблизительно постоянным, а затем с увеличением тока дуги понижается. При больших токах мощность дуги, в суммарной мощности лазерно-дугового источника, составляет большую часть, а поскольку эффективность тепловвода дуги меньше, то это и обуславливает наблюдаемое понижение полного КПД (рис. 10).

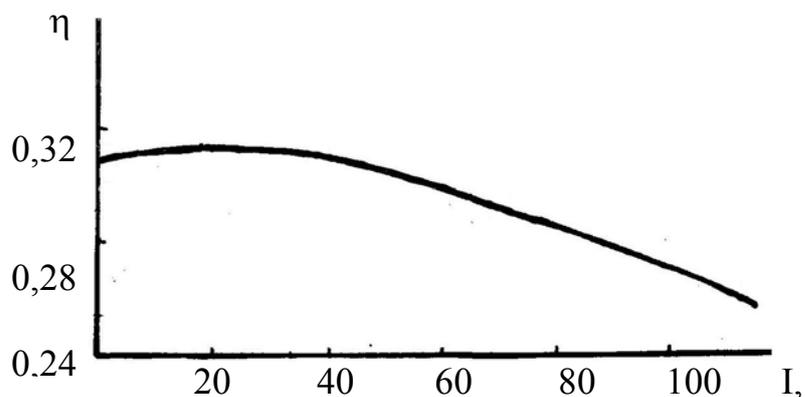


Рис. 10. Зависимость полного теплового КПД лазерно-дуговой сварки от тока дуги  
(сталь 08X18H10T,  $P=900$  Вт;  $V_{св}=21,3$  мм/с)

В результате снижения КПД, с увеличением доли мощности дуги в суммарной мощности лазерно-дугового источника нагрева, уменьшается и скорость сварки, что подтверждается экспериментальными исследованиями (рис. 11).

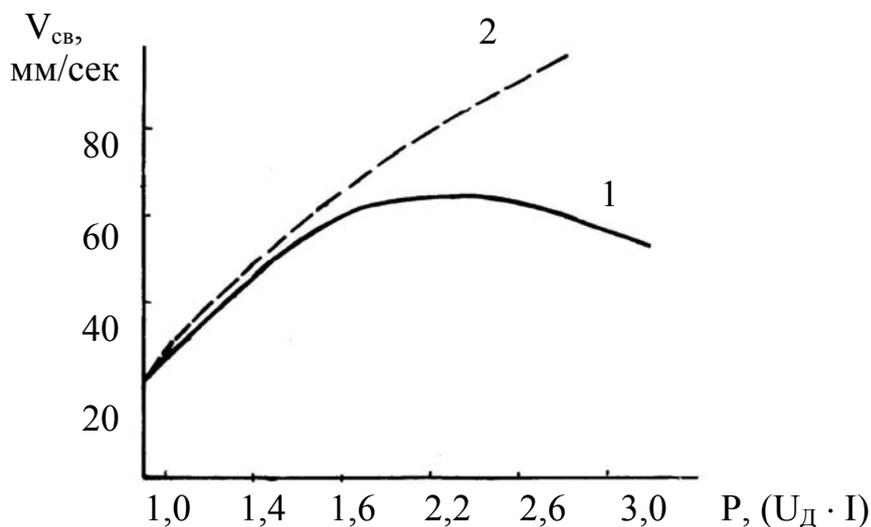


Рис. 11. Предельные скорости сварки при проплавлении пластин толщиной 1,5 мм на всю глубину:  
1—лазерно-дуговая сварка ( $P=900$  Вт); 2—лазерная сварка

Определялась предельная скорость  $V_{св}$ , обеспечивающая полный провар пластины из нержавеющей стали толщиной  $H = 1,5$  мм, при увеличении мощности источника нагрева, за счет повышения мощности дуги, при постоянном значении мощности лазерного луча – 900 Вт (рис. 11), кривая 1. На этом же рисунке нанесены расчетные (кривая 2) значения предельной скорости лазерной сварки в зависимости от мощности, полученные пересчетом по экспериментальному режиму ( $P = 900$  Вт,  $V_{св} = 21,3$  мм/с).

## 2.2. Электрические характеристики дуги при лазерно-дуговой сварке

При лазерно-дуговой сварке электрические параметры дуги определяются не только процессами, происходящими в дуге, но и явлениями, возникающими при лазерном воздействии на металл.

При лазерно-дуговой сварке металлов напряжение на дуге ниже, чем напряжение при дуговой сварке (таблица 4), при практически постоянном сварочном токе эффект понижения напряжения на дуге свидетельствует об увеличении проводимости дугового промежутка.

Таблица 4

Материал анода	Вид сварки и параметры дуги				
	дуговая		лазерно-дуговая		
	$U_d, В$	$I, А$	$U_d, В$	$I, А$	$P, Вт$
Нержавеющая сталь	26,6	20	20,2.	20	500
Медь	29,9	75	24,8	75	900
Титан	22,0.	35	19,0	35	500
Алюминий	23,1	30	17,3	30	900

Увеличение проводимости дугового промежутка может происходить либо при уменьшении объема ионизированного газа за счет локализации и стабилизации дуги, либо за счет дополнительного источника заряженных частиц в дуговом промежутке, вследствие интенсивного испарения материала образца (анода) под действием лазерного излучения.

Зависимости напряжения на дуге от мощности лазерного излучения (рис. 12) показывают, что резкое уменьшение напряжения на дуге происходит при мощности излучения 500 Вт во всем диапазоне исследуемых токов.

Экспериментально установлено, что в случае лазерной сварки, при одинаковых условиях фокусировки, переход от теплопроводностного режима проплавления к режиму сварки с кинжальным проплавлением наблюдается начиная с мощности 500 Вт. Следовательно, при этих условиях на поверхности свариваемого материала достигается режим интенсивного испарения, который и обеспечивает глубокое проплавление. Пары металла при температуре интенсивного испарения (порядка температуры кипения) являются эффективным источником заряженных частиц. Именно поэтому имеет место резкое понижение напряжения на дуге.

Анализ характера формирования швов показывает, что стабилизация дуги лазерным лучом осуществляется во всем диапазоне исследуемых мощностей. Однако существенное понижение напряжения на дуге происходит лишь при мощности лазерного луча свыше 500 Вт. Таким образом, проводимость дуги при лазерно-дуговой сварке повышается вследствие увеличения концентрации заряженных частиц в дуговом промежутке за счет интенсивного испарения материала под действием лазерного излучения.

Как было показано выше, фокусировка лазерного излучения достаточной интенсивности в пятно нагрева дуги приводит к испарению материала из зоны воздействия луча, а пары металла являются эффективным источником заряженных частиц в анодной зоне. Это снижает анодный потенциал практически до нуля. Экспериментально этот факт подтверждается тем, что снижение

общего напряжения на дуге при лазерно-дуговой сварке с мощностью излучения более 500 Вт происходит до одной и той же величины независимо от тока дуги (рис. 14).

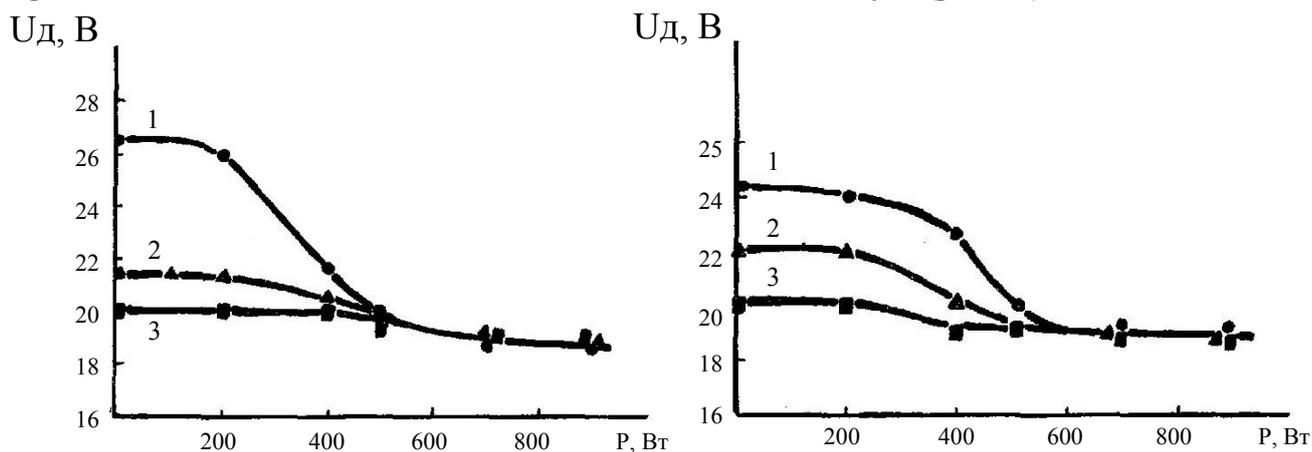


Рис. 12. Зависимость напряжения на дуге от мощности лазерного излучения, при сварке нержавеющей стали (а):  
1 –  $I=75$  А; 2 –  $I=50$  А; 3 –  $I=20$  А;

В соответствии с этим вольт-амперные характеристики дуги при лазерно-дуговой сварке смещены по отношению к вольт-амперным характеристикам дуги при дуговой сварке в сторону меньших напряжений, т. е. лазерное излучение оказывает такое же влияние, как и уменьшение длины дуги. Снижение анодного потенциала приводит к перераспределению напряжения по столбу дуги, повышению эффективности тепловода электрической энергии в свариваемый металл и соответствующему влиянию на геометрию формирования шва.

### 2.3. Особенности формирования геометрии шва при лазерно-дуговой сварке

Формирование геометрии проплавления при лазерно-дуговой сварке определяется энергетическим балансом энергии лазерного излучения и электрической дуги и их количественным соотношением между собой. При лазерной сварке с  $W_p \geq W_{кр}$  формирование шва происходит в режиме кинжального проплавления, который характеризуется узким и глубоким швом с большим значением коэффициента формы шва.

Механизм формирования геометрии шва при дуговой сварке определяется механизмом теплопроводности и характеризуется низким значением коэффициента формы шва. Формирование геометрии проплавления при лазерно-дуговой сварке отвечает некоторому промежуточному соотношению глубины и ширины шва и может регулироваться относительным вкладом энергии каждого источника.

В зависимости от соотношения мощностей лазерного луча и дуги геометрия проплавления изменяется от типично лазерной до типично дуговой (рис. 13).

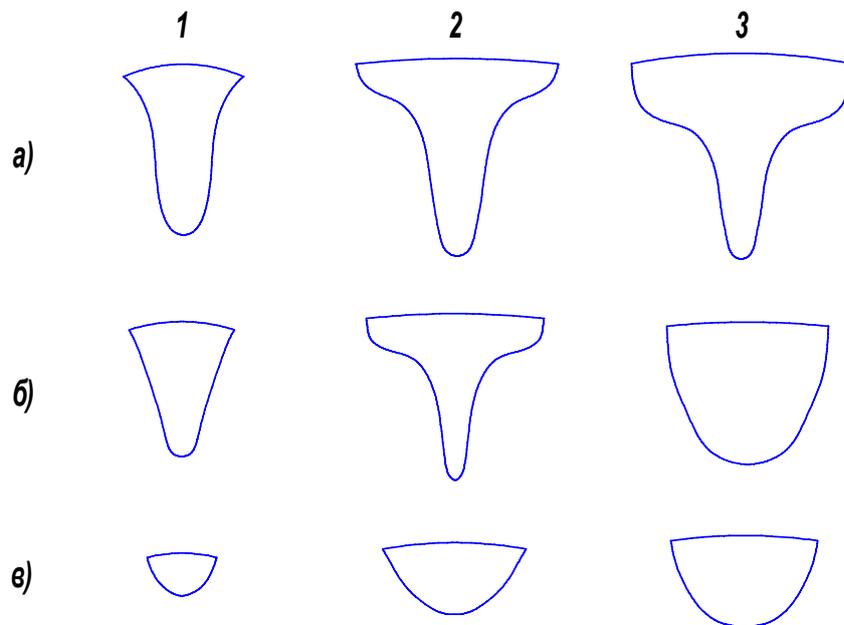


Рис. 13.

Изменение формирования

геометрии формы шва при варьировании мощности лазерного излучения и мощности дуги: а –  $P=900$  Вт; б –  $P=500$  Вт; в –  $P=200$  Вт;  $V_{св} = \text{const}$ :

1 –  $I = 20$  А; 2 –  $I = 75$  А; 3 –  $I = 105$  А

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что если мощность лазерного излучения  $P \geq U_{дI}$  форма проплавления практически соответствует получаемой при лазерной сварке. Увеличение мощности дуги, при выполнении условия  $U_{д} \cdot I < P$ , приводит к расширению литой зоны у поверхности (рис. 13а). Если  $P \ll U_{дI}$ , то геометрия проплавления соответствует такой же форме, как при дуговой сварке. Так как при лазерно-дуговой сварке наблюдается, по сравнению с дуговой, снижение напряжения на дуге, то это оказывает такое же влияние, как и уменьшение длины дуги. В свою очередь уменьшение длины дуги приводит к увеличению ее силового воздействия и повышению интенсивности теплового потока от дугового источника. Вероятно, именно этим обусловлено, что в области относительно малых токов формирование зоны проплавления близко к лазерной сварке. Для больших токов эффект уменьшения напряжения менее выражен и зона проплавления расширяется.

Характер формирования зоны проплавления хорошо согласуется с результатами исследования эффективности процесса лазерно-дуговой сварки. При соотношении мощностей  $P \geq U_{дI}$  полный КПД лазерно-дугового процесса не ниже, чем при лазерной сварке, и уменьшается лишь при дальнейшем увеличении мощности дуги.

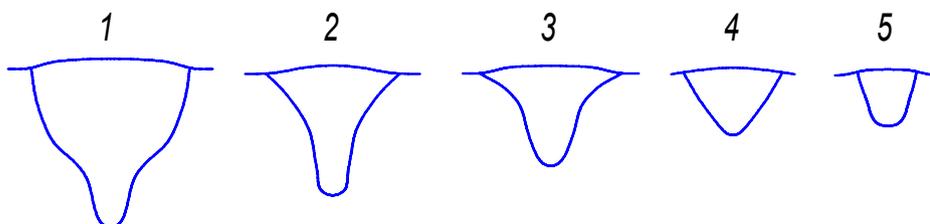


Рис. 14. Изменение геометрии шва и глубины проплавления в зависимости от скорости сварки ( $P=900$  Вт;  $I=50$  А – const):  
 1 –  $V_{св}=21,3$  мм/с; 2 –  $V_{св}=40$  мм/с; 3 –  $V_{св}=62$  мм/с; 4 –  $V_{св}=100$  мм/с;  
 Формирование геометрии шва и глубины проплавления зависит от скорости сварки (рис. 14). С увеличением скорости сварки уменьшается ширина и глубина шва.

#### 2.4. Особенности технологического процесса лазерно-дуговой сварки

Лазерно-дуговая сварка характеризуется большим количеством независимо изменяемых параметров, к которым относятся мощность лазерного излучения  $P$ , сварочный ток  $I$ , скорость сварки  $V_{св}$ , положение фокуса лазерного излучения относительно свариваемой поверхности  $\Delta F$ , диаметра электрода, угол его заточки и т. д. Обычно параметры режима сварки оптимизируют таким образом, чтобы обеспечить заданную глубину проплавления.

При лазерно-дуговой сварке глубина проплавления определяется не только параметрами сварки, но и взаимным геометрическим положением энергетических центров источников нагрева на поверхности свариваемого материала. Очевидно, что если источники не совмещены и не оказывают влияние друг на друга, то глубина проплавления определяется действием лишь лазерного или дугового источника. Исследования зависимости глубины проплавления от смещения положения дуги относительно точки фокусировки лазерного излучения в продольном и поперечном направлении показали, что смещение на величину порядка диаметра сфокусированного луча лазера  $d_f$  не оказывает существенного влияния на глубину проплавления при лазерно-дуговой сварке. Поэтому для получения максимальной глубины проплавления необходимо достаточно точно совмещать центра пятна нагрева обоих источников.

При лазерно-дуговой сварке неплавящимся электродом с увеличением тока дуги (т. е. с увеличением мощности источника нагрева за счет увеличения мощности дуги) резкое возрастание глубины проплавления происходит только в области  $P \geq U_d I$ , а при  $P < U_d I$  дальнейшее увеличение глубины происходит, как и в случае дуговой сварки (рис. 15). Выше было показано, что при выполнении условия  $P \geq U_d I$  лазерно-дуговой источник эквивалентен по эффективности нагрева лазерному.

По результатам исследований, в широком диапазоне скоростей, глубина проплавления при лазерно-дуговой сварке изменяется в зависимости от положения точки фокуса лазерного луча относительно поверхности свариваемого металла, аналогично лазерной сварке. Поэтому для случая

$P \geq U_d I$  можно воспользоваться методом расчета глубины проплавления, разработанным для лазерной сварки. Заменяя лазерно-дуговой источник на эквивалентный лазерный с мощностью

$P_{\text{ЭКВ}} = P + U_d I$  и диаметром  $d_{\text{ЭКВ}} = d_f \cdot \sqrt{\frac{P + U_d I}{P}}$ , получаем:

$$h = \frac{\eta_{\text{ЭФ}} \cdot P_{\text{ЭКВ}}}{E d_{\text{ЭКВ}} \cdot V_{\text{св}}} \cdot \frac{1}{\left(1 + 2\sqrt{a / d_{\text{ЭКВ}} V_{\text{св}}}\right)^2}, \quad (8)$$

где,  $E$  – теплосодержание,

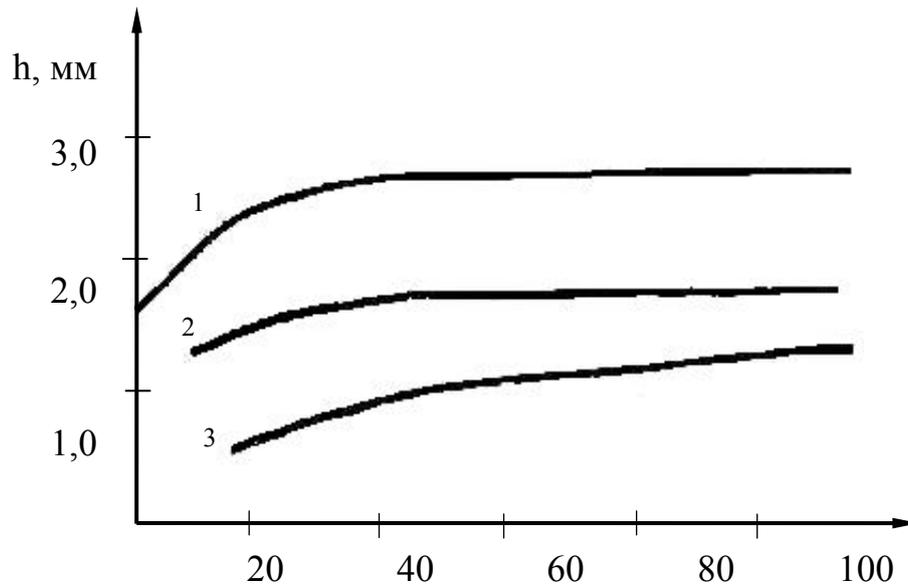


Рис. 15. Расчетные зависимости глубины проплавления от тока дуги

(сталь: 08X18H10T,  $V_{\text{св}}=21,3$  мм/с): 1 –  $P=900$  Вт; 2 –  $P=500$  Вт; 3 –  $P=200$  Вт

Эффективный тепловой КПД для лазерной сварки определяется через полный тепловой КПД  $\eta_{\text{ЭФ}}^{\text{л}} = \eta_{\text{ПР}}^{\text{л}} \left(1 + 2\sqrt{a / d_{\text{ЭКВ}} V_{\text{св}}}\right)$ . ( $\eta_{\text{пр}}$  – предельное значение полного КПД).

Расчетные значения глубины проплавления удовлетворительно согласуются с экспериментальными (рис. 16).

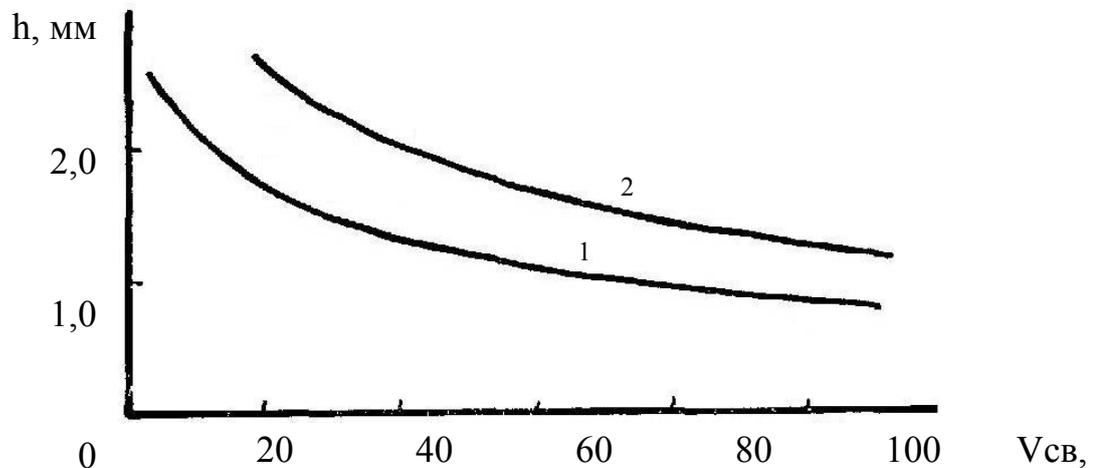


Рис. 16. Расчетные зависимости глубины проплавления от скорости сварки:  
1 – лазерная сварка  $P=900$  Вт; 2 – лазерно-дуговая сварка  $P=900$  Вт;  $I=50$  А

Рис. 17. Область образования подрезов при лазерно-дуговой сварке со сквозным проплавлением (материал 08X18H10T; толщина 1,5 мм)

## 2.5. Технологическая подготовка производства при лазерно-дуговой сварке

Одним из достоинств лазерно-дуговой сварки по сравнению с лазерной является снижение требований к точности геометрии свариваемых деталей. Максимальный зазор, не нарушающий формирования сварного шва, зависит, прежде всего, от тока дуги и скорости сварки (рис. 18).

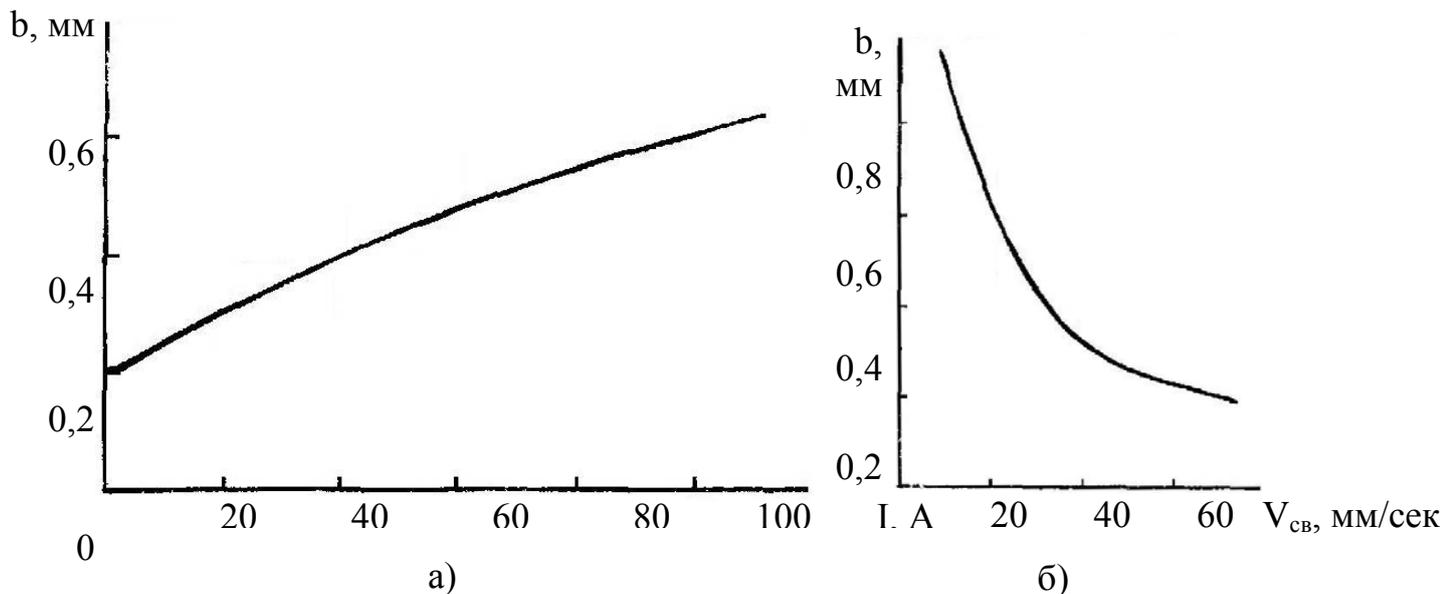


Рис. 18. Изменение предельной величины зазоров при сварке в стык от тока дуги (а) и скорости сварки (б)

Максимально допустимый зазор определяется поперечным размером сварочной ванны и свойствами материала. Величина  $b$  линейно возрастает с увеличением тока дуги и быстро понижается с увеличением скорости сварки. Минимальные зазоры соответствуют «чисто» лазерной сварке и могут быть определены как  $b \approx 0,15H$ .

## 2.6. Техничко-экономическая эффективность лазерно-дуговой сварки

Сочетание дуговой и лазерной сварки взаимно дополняет друг друга своими преимуществами и взаимно нивелируют недостатки присущие каждому из методов сварки:

- воздействие дуги на металл увеличивает коэффициент поглощения лазерного излучения, способствуя повышению эффективного и термического КПД сварки;
- дуга уменьшает коэффициент формы шва и повышает технологическую воспроизводимость процесса сварки;

- дуга, увеличивая объемы расплава, позволяет уменьшить жесткость термического цикла и, следовательно, благоприятно влияет на технологическую прочность сварного соединения;
- дуга позволяет снизить требования по точности геометрии сборки свариваемых деталей;
- воздействие лазерного излучения на металл в режиме глубокого проплавления сопровождается интенсивным испарением и плазмообразованием, что обеспечивает стабилизацию и локализацию положения центра пятна дуги;
- гибридный процесс сварки позволяет снизить мощность лазерного луча и, соответственно, потребление энергии от лазерного источника. Твердотельный лазер имеет полный КПД примерно 3%. Снижение мощности лазерного излучения на 1 кВт дает снижение потребляемой мощности из электрической сети приблизительно на 35 кВА;
- замена до половины лазерной мощности на электрическую мощность дуги не снижает эффективности и производительности процесса лазерной сварки. Именно в этом состоит главная технико-экономическая эффективность лазерно-дуговой сварки, так как стоимость одного кВт лазерной энергии намного больше одного кВт энергии дуги. Гибридная лазерно-дуговая сварка, как показывают расчеты, при полной загрузке оборудования в 1,5÷2 раза более эффективна по сравнению с лазерной;
- гибридная лазерная сварка требует существенно меньших капиталовложений, чем процесс лазерной сварки, так как оборудование для дуговой сварки стоит значительно меньше;

Таким образом, гибридная лазерно-дуговая сварка реализует технологический процесс в котором взаимно усиливаются преимущества каждого из методов сварки, а недостатки каждого нивелируются, что приводит к расширению технологических возможностей.

### **3. ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-СВЕТОЛУЧЕВАЯ СВАРКА**

Гибридная лазерно-светолучевая сварка – это способ сварки, при котором формирование сварочной ванны происходит при одновременном действии лазерного излучения и светового луча. Свет, как источник энергии, издавна привлекал к себе внимание человечества. По мере развития науки и техники, различные физические явления, связанные со световым излучением, находят все более широкое применение в научных и промышленных целях.

Возможность фокусирования светового потока в небольших объемах пространства и получение  $W_E$  и  $W_P$  достаточных для нагрева и плавления различных конструкционных материалов открыли принципиальную возможность применения световой энергии для сварки, пайки, термообработки.

Полихроматический свет от промышленных световых ламп, вследствие хроматической, сферической аберрации и конечных размеров световых ламп удается сфокусировать в минимальную локальную область, с характерным размером  $d_f \sim 1$  мм. В результате, достигнутая в настоящее время, наибольшая плотность мощности в пятне нагрева составляет  $\approx 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>, что

соизмеримо с нагревом от пламени газовой горелки . Схема процесса светолучевой сварки показана на рис. 19 .

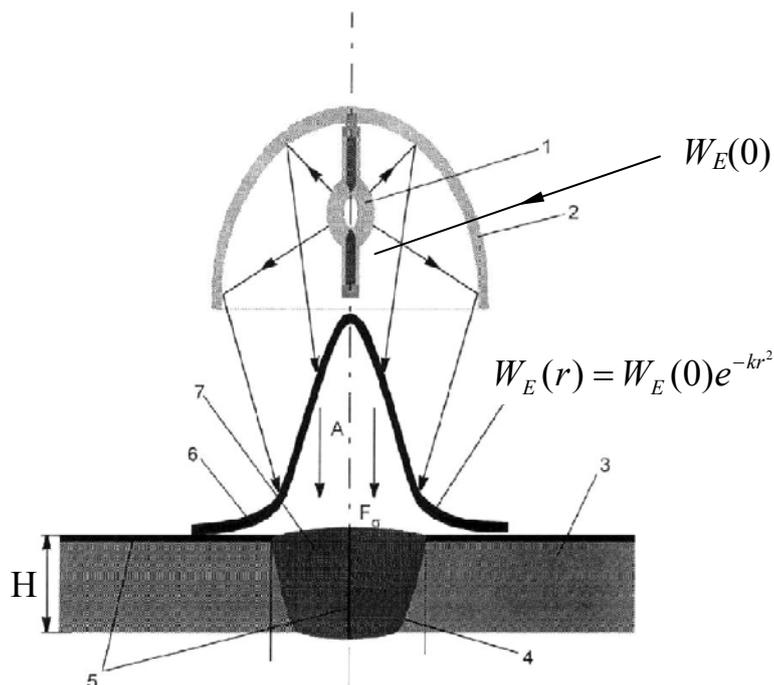


Рис. 19. Схема процесса светолучевой сварки (H – толщина листа):

1 – источник излучения; 2 – фокусирующий отражатель; 3 – свариваемые детали; 4 – сварочная ванна; 5 – оксидная пленка; 6 – распределение потока по пятну; 7 – конвективные потоки

Сущность светолучевой обработки конструкционных материалов заключается в преобразовании энергии света в тепловую энергию. Основными достоинствами светолучевых методов обработки являются: отсутствие механического воздействия на обрабатываемую деталь; возможность плавного программного регулирования и поддержания температуры в зоне обработки.

При разработке технологии светолучевой сварки для повышения коэффициента A в качестве рабочей среды для низкоуглеродистых сталей целесообразно использовать воздух, а для высоколегированных – азот. Термические циклы при светолучевой сварке менее жесткие, чем при лазерной сварке или лазерно-индукционной (рис. 20)

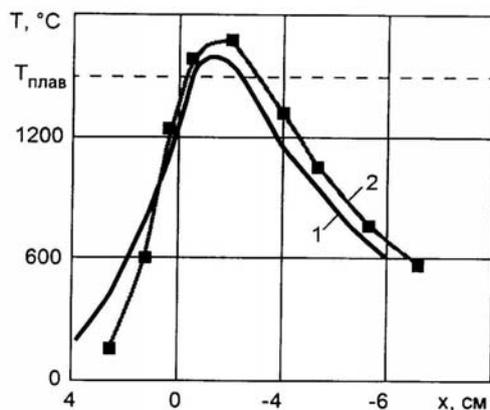


Рис. 20. Расчетный (1) и экспериментальный (2) термические циклы сварки для стали 08Ю

. Светолучевая сварка имеет следующие технологические особенности:

- снижение газонасыщения металла шва за счет незначительной ионизации газов в зоне обработки;
- отсутствие электрических и магнитных полей в зоне обработки;
- низкая себестоимость погонного метра шва по сравнению с лазерной сваркой;
- высокий энергетический КПД светолучевой установки до 45%;
- высокая экологическая чистота технологического процесса по сравнению с традиционными сварочными процессами;
- простота в работе и обслуживании;
- высокая безопасность технологии.

Эти особенности определили следующие области применения метода: сварка в стык тонколистовых (0,3 ÷ 4,0 мм) однородных и разнородных металлов и материалов (углеродистые и нержавеющие стали, титановые, алюминиевые, медные сплавы; неметаллические материалы: стекло, пластмасса, керамика; скорость сварки 10÷60 м/час).

Возможность получать в зоне светолучевой обработки плотности мощности порядка  $10^3$  Вт/см<sup>2</sup> и получать температуру до 3000°С может быть использована в гибридной лазерно-светолучевой сварке для предварительного или сопутствующего подогрева, для уменьшения жесткости термического цикла при лазерной сварке. Изменение физико-химических свойств поверхности материала, которое сопутствует светолучевой обработке, изменяет оптические свойства поверхности и увеличивает коэффициент поглощения лазерного излучения и тем самым повышает эффективность сварки.

Гибридная технология лазерно-светолучевой сварки обеспечивает повышение скорости сварки тонколистовых соединений толщиной до 1,0 мм. Световой луч обеспечивает закрытие, в результате нагрева кромки тонколистового стыка, зазора перед лазерным лучом, что исключает прожоги тонколистовых соединений и снижает затраты на подготовку кромок. Лазерно-светолучевая обработка позволяет программировать термический цикл в зоне обработки.

В настоящее время выпускаются переносные светолучевые сварочные установки, которые предназначены для ручной светолучевой сварки металлов и неметаллических материалов, сварки их комбинаций, пайки и резки металлов. В горелке используется ксеноновая дуговая лампа мощностью от 1,0 кВт до 2,0 кВт с комбинированной системой водяного и воздушного охлаждения лампы. Горелки установок снабжены набором сменных насадок для выполнения работ в защитных газах и термической резки различных материалов. С помощью этих установок сваривают металлы толщиной от 0,1 до 1,0 мм.

Преимущества данного гибридного метода сварки заключаются в следующем:

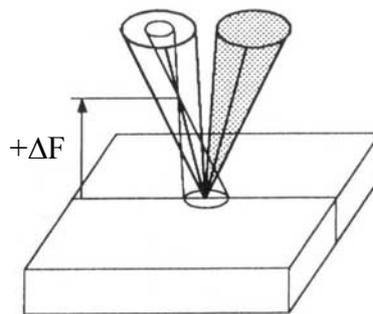
- Скорость сварки возрастает в 4 раза (Al), в 6 раз (Fe) на толщинах 0,5 мм;

- Значительное увеличение глубины проплавления: от 0,3 мм при лазерной сварке стали до 0,8 мм при совмещенной сварке лазером и световым источником;
- Снижение себестоимости изготавливаемой на нем продукции за счет комплектации световым модулем;
- Повышение качества сварных соединений;
- Экономия потребляемой электроэнергии;
- Расширение технологических возможностей лазера;
- Существенное сокращение времени на подготовительные операции к сварке тонколистовых соединений.

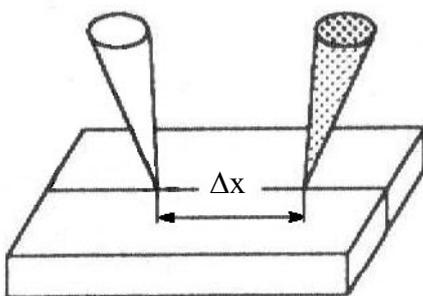
#### 4. ДВУХЛУЧЕВАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

Одним из направлений развития гибридных лазерных технологий обработки материалов является технология двухлучевой лазерной обработки материалов, т. е. такого способа сварки при котором формирование сварочной ванны происходит при одновременном воздействии двух лучей лазера.

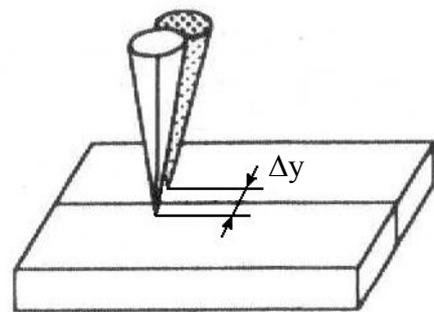
Существует несколько способов обработки материалов двумя лучами – суперпозиционный (рис. 21а), последовательный (рис. 21б) и параллельный (рис. 21 в), которые определяются различными геометрическими расположениями двух лучей лазера относительно друг друга и выполнением различных функциональных задач при лазерной обработке материалов.



а) наложение лучей лазера – суперпозиционная лазерная обработка



б) последовательная лазерная обработка



в) параллельная лазерная обработка

Рис. 21. Различные виды двухлучевой лазерной обработки

Выбор способа обработки двумя лучами лазера определяется конкретным видом лазерной технологии – сварки, наплавки, термообработки и технологическими задачами, стоящими перед сваркой.

Формирование 2<sup>x</sup> лучей лазера может быть реализовано различными способами (рис. 22).

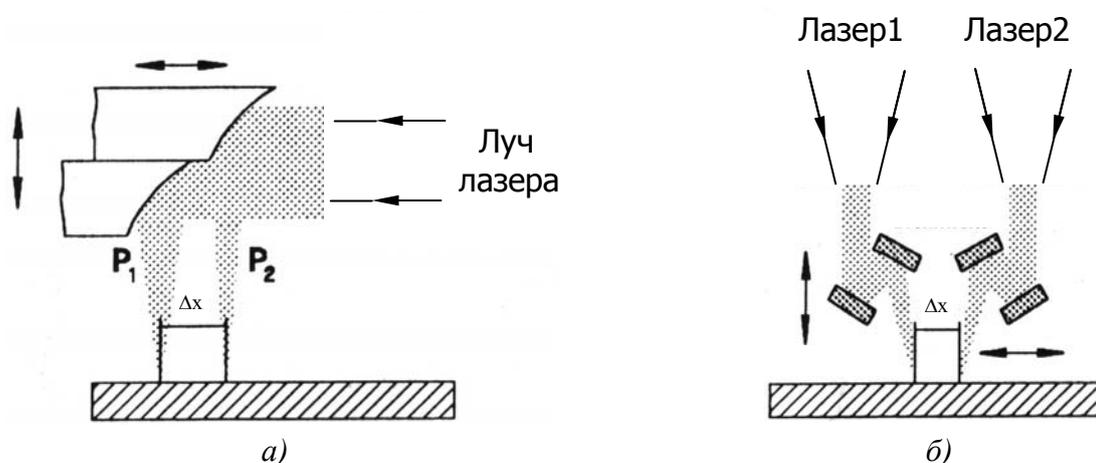


Рис. 22. Функциональные схемы формирования двух лучей лазера

- а) используется один лазер
- б) используется два лазера

В настоящее время разработаны технологические лазеры, на выходе из резонатора которых имеются одновременно два луча лазера.

### 3.1. Технологические особенности двухлучевой лазерной сварки

Сварка двумя параллельными лучами.

Лазерную сварку двумя параллельными лучами используют (рис. 23) для уменьшения порообразования, устранения прожогов, соединения разнотолщинных деталей.

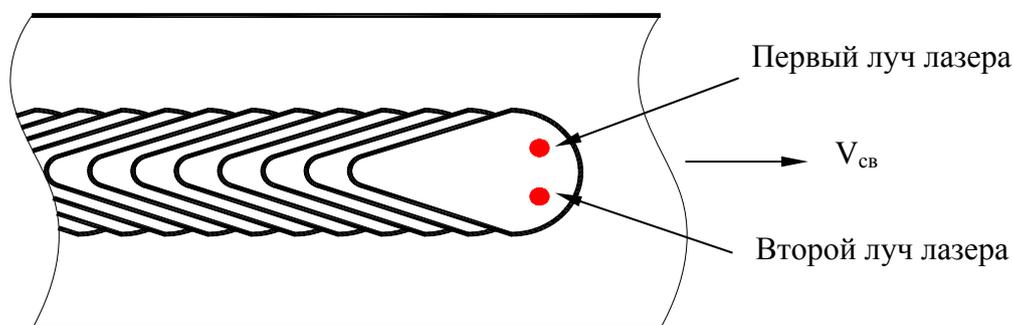


Рис. 23. Лазерная сварка с использованием двух параллельных лучей лазера

При сварке разнотолщинных материалов (рис. 24), мощность второго луча может быть значительно ниже мощности первого луча, что снижает вероятность образования прожогов при сварке разнотолщинных материалов.

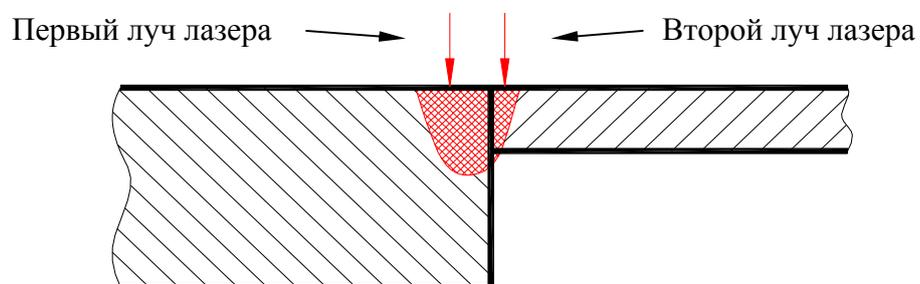


Рис. 24. Лазерная сварка разнотолщинных материалов двумя параллельными лучами

Использование лазерной сварки с двумя параллельными лучами лазера становится особенно эффективно, когда необходимо уменьшить высокоинтенсивную центральную часть теплового источника сварки, например, при сварке в стык тонколистовых материалов (рис. 25).

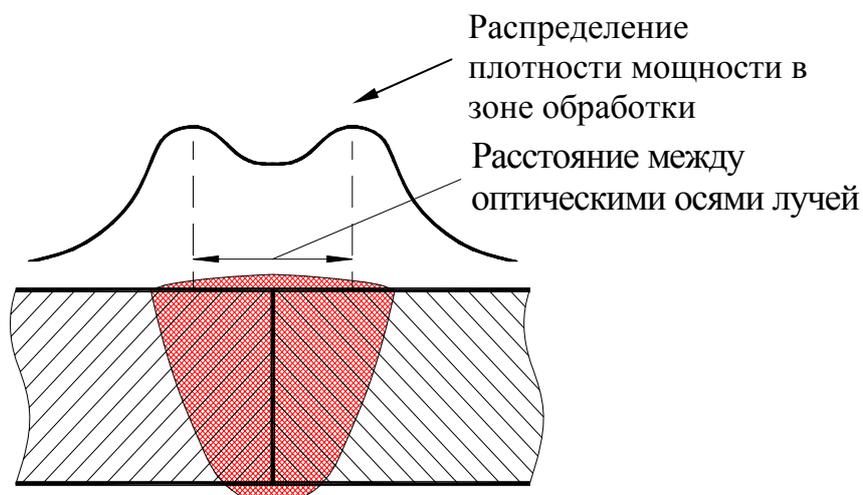


Рис. 25. Управление плотностью мощности в стыке шва за счет изменения расстояния между оптическими осями лучей лазера

Получаемое за счет одновременного действия двух лучей лазера распределение мощности по сечению стыка сварного соединения оказывает позитивное влияние на формирование шва, особенно при сварке тонколистовых материалов.

## Сварка двумя последовательными лучами лазера

Сварные швы, формирующиеся при высоких скоростях сварки, не всегда соответствуют всем требованиям по качеству сварного соединения, вследствие существования нестабильностей процесса. При больших скоростях сварки, когда возникает гидродинамическая нестабильность жидкой фазы поверхности ванны расплава, приводящая к образованию “горба” или появлению несплошностей можно использовать последовательное воздействие лучей различной мощности (рис. 26).

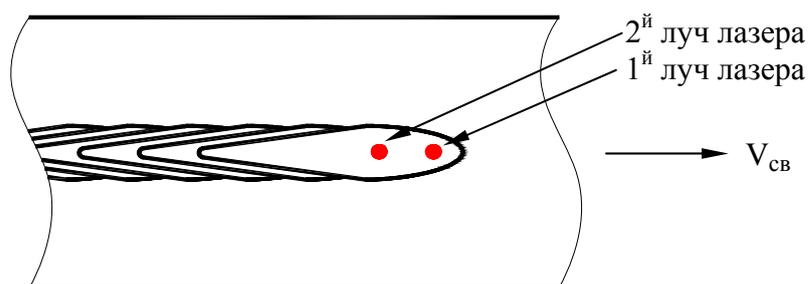
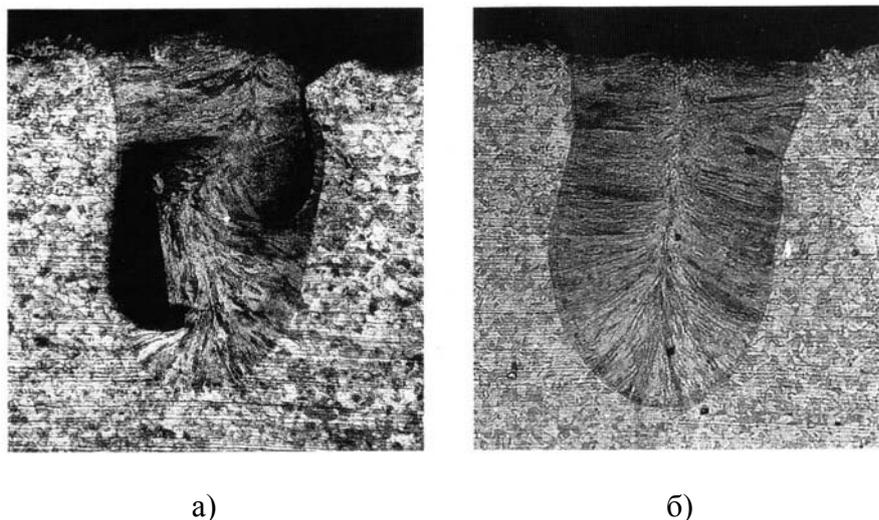


Рис. 26. Лазерная сварка двумя последовательными лазерными лучами

На динамику процесса плавления, при лазерной сварке двумя последовательными лучами оказывает влияние расстояние  $\Delta x$  между центрами диаметров лучей. Оптимизация  $\Delta x$  позволяет повысить максимальную скорость сварки приблизительно на 50%, при которой могут быть получены бездефектные сварные соединения (рис. 27).



а)  $\Delta x = 0$  мм ;б)  $\Delta x = 2$  мм

Рис. 27. Макроструктура швов стали 10X6CrNiTi18, полученных двухлучевой лазерной сваркой последовательными лучами;  $V_{св} = 433$  мм/сек; суммарная мощность  $P_L = 7$  кВт ( $P_1 = P_2 = 3,5$  кВт)

## Лазерная сварка суперпозиционными лучами

При этом методе сварки два различных луча направляются в одну точку, при этом параметры этих лучей как по мощности, так и по оптическим характеристикам могут быть различными.

Важнейшей характеристикой луча лазера является качество лазерного излучения. Качество лазерного излучения определяется многими факторами – модовым составом, распределением энергии по сечению луча, поляризацией, расходимостью, диаметром луча. Если лазерное излучение одномодовое, распределение энергии по сечению пучка гауссово, поляризация круговая, то коэффициент качества луча определяется как отношение дифракционной расходимости лазерного излучения к фактической расходимости. Если расходимость лазерного излучения равна дифракционной, то коэффициент качества –  $K$  равен единице, если больше, то меньше единицы  $0 < K < 1$ . Чем больше значение  $K$ , тем выше качество лазерного излучения.

Дифракционная расходимость  $\theta_d$  одномодового лазерного излучения с гауссовым распределением энергии по сечению пучка определяется по формуле (10)

$$\theta_d = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\lambda}{d} \quad (10)$$

где,  $d$  – диаметр луча лазерного излучения;

Коэффициент качества лазерного излучения –  $K$  определяется как

$$K = \frac{\theta_d}{\theta} \quad (11)$$

Таким образом, коэффициент качества

$$K = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{d \cdot \theta} \quad (12)$$

Диаметр сфокусированного луча –  $d_f$  определяется расходимостью лазерного излучения и фокусным расстоянием

$$d_f = F \cdot \theta = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{F}{d \cdot K} = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{K} \quad (13)$$

где,  $f$  – фокусирующее число  $f = \frac{F}{d}$ .

Таким образом, чем больше значение  $K$ , то есть чем выше качество луча лазера, тем меньше диаметр сфокусированного луча лазера и тем выше  $W_p$  (при заданном уровне мощности излучения) и соответственно больше глубина проплавления. Глубина проплавления зависит от скорости сварки и параметров  $K$  и  $f$  (рис. 28).

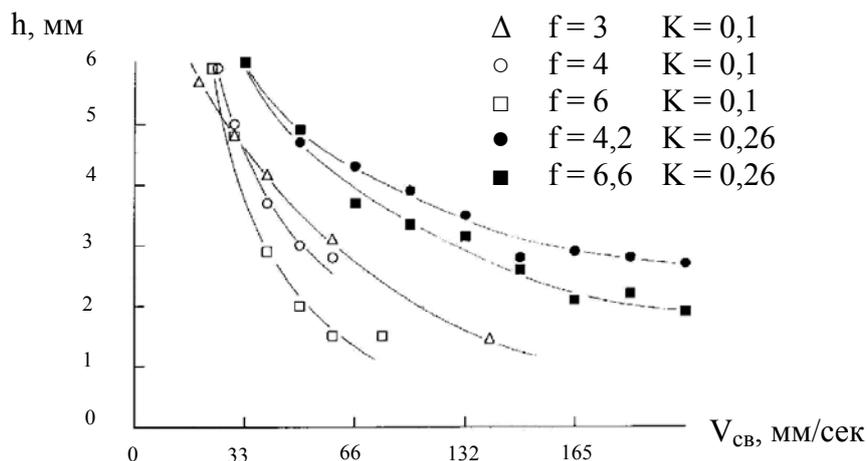


Рис. 28. Зависимость глубины проплавления от скорости сварки при различных значениях параметров  $f$  и  $K$ ,  $P_L = 4,5$  кВт, защитный газ - гелий где,  $P_L$  – суммарная мощность лучей лазера

Лазеры высокой мощности имеют, в общем случае, невысокое значение качества луча. Улучшить эти характеристики можно при суперпозиции отдельных лучей от лазеров меньшей мощности, имеющих высокое значение коэффициента качества луча. Тем самым могут быть повышены два параметра – суммарная мощность и качество излучения (рис. 29).

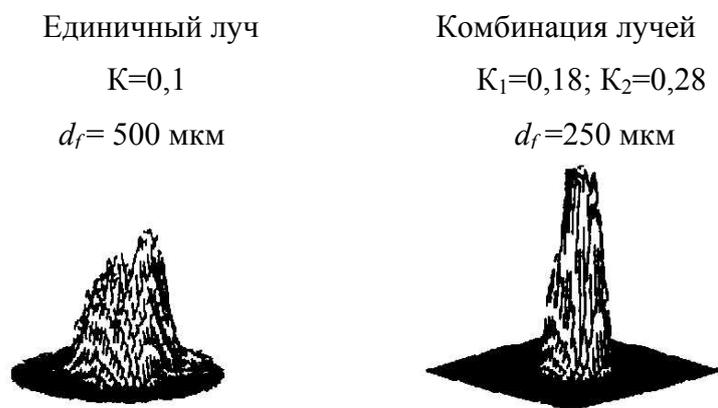


Рис. 29. Распределение мощности луча лазера в фокусе, при суперпозиции лучей лазера  $P_L = 5,8$  кВт.

Комбинацией двух лучей можно достигнуть большей глубины проплавления, чем одним лучом лазера той же мощности (рис. 30).

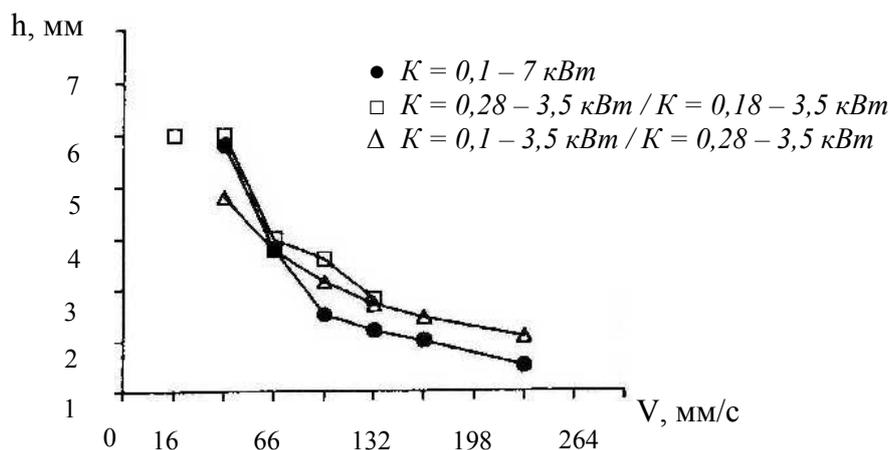


Рис. 30. Зависимость глубины проплавления при лазерной сварке одним лучом и двухлучевой сварке от скорости сварки

Из рис. 30 видно влияние коэффициента качества луча на достигаемую глубину проплавления сварки (при одинаковой суммарной мощности). Результат показывает, что через суперпозицию двух лучей  $\text{CO}_2$ -лазеров достигается повышение глубины проплавления особенно на высоких скоростях сварки.

Впервые лазерная сварка двумя последовательными лучами была применена фирмой ЕАДС, Германия .

Целью внедрения технологии лазерной сварки при производстве воздухозаборников было снижение производственных затрат, так как существующая технология была связана с большим объемом механической обработки – фрезерования.

При разработке технологии лазерной сварки с присадкой Т-образного соединения вкладышей воздухозаборника, изготовленного из алюминиевого сплава одним лучом было выяснено, что наряду с обычной чешуйчатостью поверхности сварного шва, выполненного с присадкой, наблюдается брызгообразование жидкой фазы ванны расплава и образование единичных открытых пор на поверхности. Указанные дефекты обусловлены технологическим процессом лазерной сварки одним лучом и не устраняется путем оптимизации параметров сварочного процесса.

Предложенная схема (рис. 31) гибридной лазерной сварки двумя последовательными лучами позволила устранить вышеуказанные недостатки

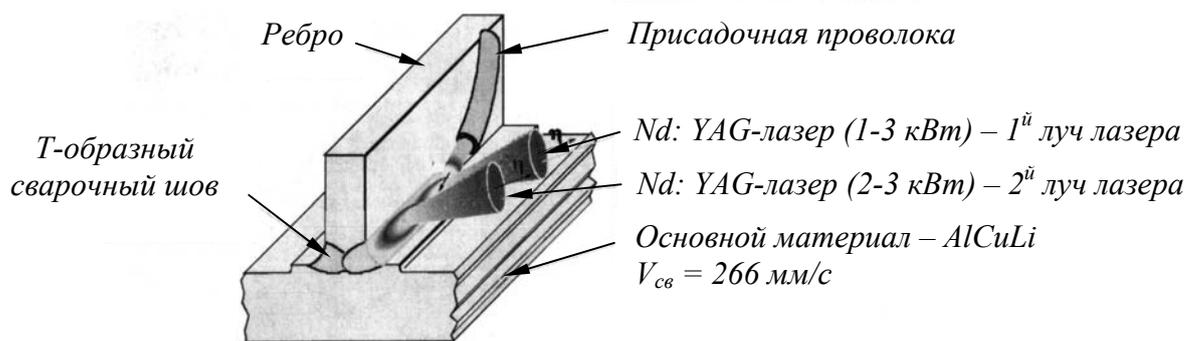


Рис. 31. Схематическое изображение лазерной сварки двумя последовательными лучами с присадкой

Для реализации технологии двухлучевой лазерной сварки было создано роботизированное рабочее место для сварки вкладышей воздухозаборника с использованием твердотельного YAG-лазера со световолоконной системой .

Для реализации двухлучевой лазерной обработки создан двухлучевой лазер модели “ТАНДЕМ”. Этот лазер имеет ряд конструктивных особенностей:

- на выходе излучателя одновременно два лазерных луча;
- расстояние между оптическими осями лучей лазера регулируется;
- имеется возможность плавно перераспределять мощность излучения между лучами;
- выходящие из резонатора лучи лазера имеют прямоугольное сечение;
- лазер “ТАНДЕМ” универсален – может производить технологические операции резки, сварки, термообработки, наплавки, напыления, лазерно-плазменную обработку; имеет режим работы с безгелиевой смесью; полностью автоматизирован, включая автоюстировку резонатора.

Основные технические характеристики CO<sub>2</sub>-лазера модели “ТАНДЕМ”, приведены в Таблица 5 .

Таблица 5

Технические характеристики	ПАРАМЕТРЫ
Длина волны	10,6 мкм
Номинальная мощность	6,0 кВт
Диапазон регулирования мощности	0,1÷7 кВт
Стабильность мощности	±3%
Диаметр луча лазера	20×20 (квадрат)
Модовый состав	TEM <sup>*</sup> <sub>00</sub>
Расходимость (полный угол)	< 1,4 мрад
Стабильность расходимости	< 0,1 мрад
Поляризация	линейная, 0° (от вертикали)
Наличие двух лучей - Расстояние между оптическими осями лучей;  - Перераспределение мощности в лучах лазера	+ min 15 мм max 25 мм  20%→80% 1 <sup>й</sup> луч 80%→20% 2 <sup>й</sup> луч
Частота импульсов	0÷1,0 кГц
Потребляемая мощность	70 кВт
Чистота газов	99,9
Расход газов (CO <sub>2</sub> ; N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> ; He) л/час	5:35:60
Габариты лазера, мм: длина ширина высота	3200× 1050× 2000
Вес, кг	1900

## 5. ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУКЦИОННАЯ СВАРКА

Гибридная лазерно-индукционная сварка – это способ сварки, при котором формирование сварной ванны происходит при одновременном действии лазерного излучения и токов высокой частоты.

Жесткий термический цикл, сопутствующий лазерной сварке, имеет, с одной стороны, определенные преимущества (малые зоны термического воздействия, уменьшение влияния межкристаллитной коррозии, снижение уровня продольных и поперечных деформаций), а с другой стороны, в ряде случаев, может приводить к снижению технологической прочности сварного соединения.

Уменьшение жесткости сварочного термического цикла может быть реализовано использованием гибридной лазерно-индукционной сварки, то есть когда сварочная ванна формируется при одновременном воздействии луча лазера и токов высокой частоты (ТВЧ-нагрев) (рис. 32).

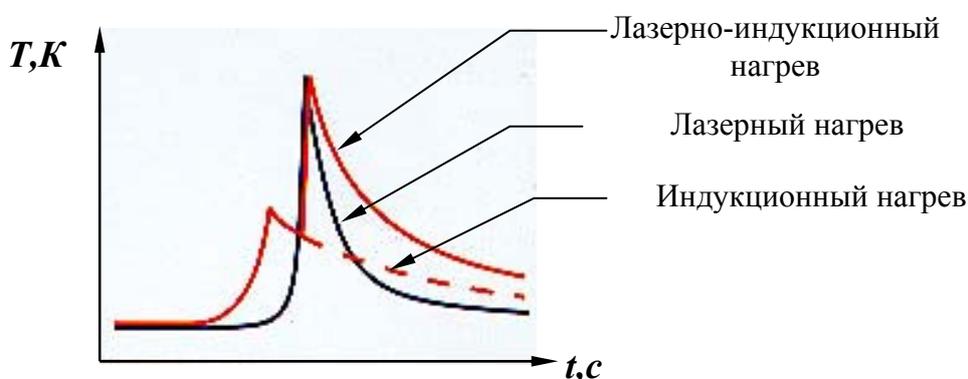


Рис. 32. Влияние индукционного предварительного подогрева на термический цикл при лазерной сварке сталей

Как показано на рис. 30, жесткость термического цикла снижается при гибридной лазерно-индукционной сварке, что благоприятно сказывается на технологической прочности при сварке среднеуглеродистых сталей с  $C = 0,26 \div 0,45\%$  и легированных сталей с  $C > 0,2\%$ .

Функциональная схема технической реализации способа лазерно-индукционной сварки показана на (рис. 33).

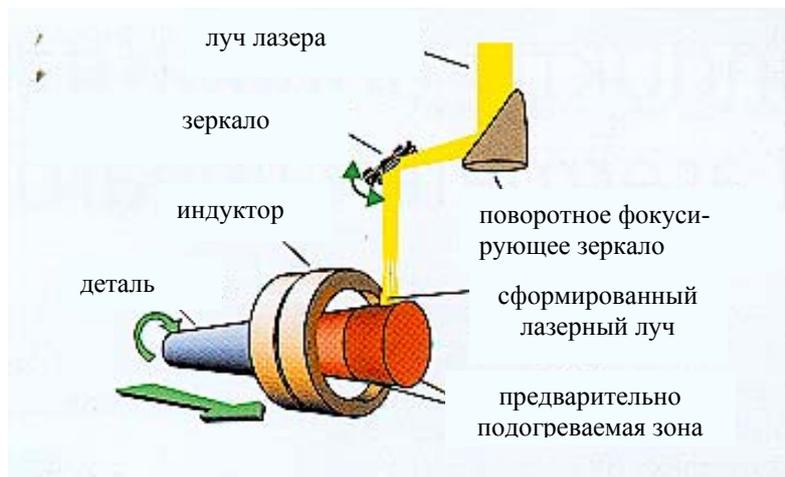


Рис. 33. Функциональная схема технической реализации лазерно-индукционной сварки

Лазерно-индукционная сварка значительно снижает градиенты температуры на границе шва и свариваемого металла, что благоприятно сказывается на технологической прочности сварного соединения (рис. 34).

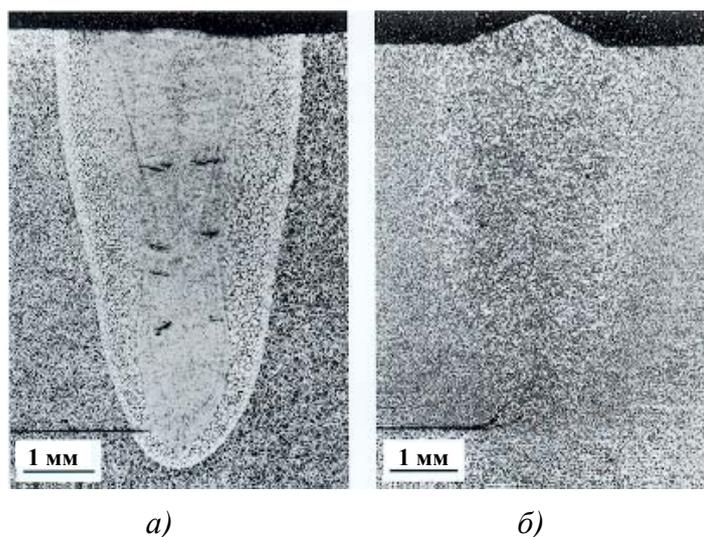


Рис. 34. Шов сварного соединения Ст45

- а) шов после обычной сварки лазером (видно наличие трещин)
- б) шов, выполненный лазерно-индукционной сваркой (трещин нет)

#### Преимущества лазерно-индукционной сварки

В сравнении с подогревом в печи, индукционный способ подогрева имеет следующие преимущества:

- полностью параллелен с машинным временем цикла лазерной сварки;
- невысокие инвестиционные затраты;
- невысокий расход энергии;

- прост в обращении;
- меньший нагрев свариваемого узла;
- исключение отпуска уже сваренных деталей;
- снижение длительности технологического цикла;
- компактный дизайн оборудования.

Лазерно-индукционная сварка, сохраняя все преимущества лазерной сварки, уменьшает жесткость термического цикла и повышает свариваемость.

В настоящее время ежегодно методом лазерно-индукционной сварки сваривается до 450000 приводных валов автомобилей из сталей С38/26Mn5. Приводные валы имеют меньший износ и выдерживают большую нагрузку по сравнению с обычно сваренными валами .

Лазерно-индукционная сварка позволяет сваривать пружинные, цементируемые стали, а также чугун.

## 6. ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА

Гибридная лазерно-плазменная сварка – это способ сварки, при котором формирование сварочной ванны происходит при одновременном действии луча лазера и плазменной струи.

При плазменной обработке источником тепла служит плазменная струя – поток ионизированных частиц, обладающих высокой энергией.

Плазменной струей принято называть сжатый дуговой разряд с интенсивным плазмообразованием. Плазменная дуга может быть прямого и косвенного действия. В первом случае анодом служит изделие (рис. 35,а), и столб дуги в этих случаях часто называют "проникающей дугой", а также дугой прямого действия. Если анодом служит сопло, которое конструктивно может совпадать с каналом плазменной головки, то источник теплоты становится независимым от изделия со струей плазмы, выделенной из столба дуги в виде факела (рис. 35,б). Такую дугу называют дугой косвенного действия или просто плазменной струей.

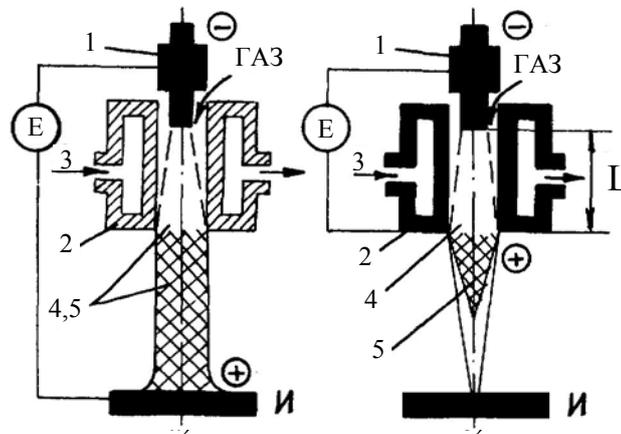


Рис. 35. Принципиальные схемы дуговых плазменных горелок прямого (а) и косвенного (б) действия 1 – вольфрамовый электрод – катод; 2 – канал сопла; 3 – охлаждение; 4 – сжатая дуговая плазма; 5 – столб дуги (струя); Е – источник тока; И – изделие

Плазменная дуга, благодаря обжатю ее в канале сопла газовым потоком, в отличие от обычной дуги, характеризуется высокими температурами столба (рис. 36) (до 15300...25000 К и более) и высокими скоростями потока плазмы. Это значительно расширяет ее технологические возможности при резке, сварке, наплавке и напылении материалов.

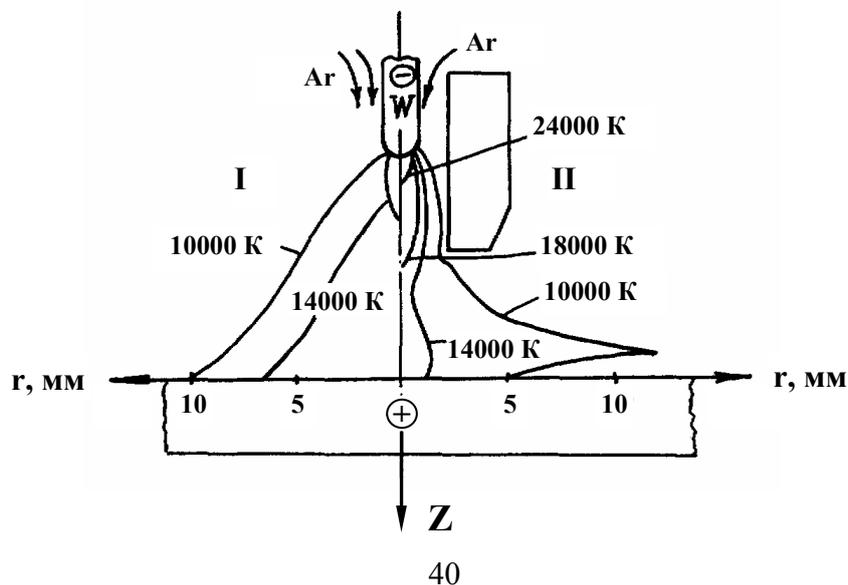


Рис. 36. Распределение температур в обычной дуге (I) и плазменной (II) струе

Для получения дуговой плазменной струи используют специальные плазменные головки, так называемые плазмотроны, в которых обычно имеется неплавящийся вольфрамовый или медный катод, изолированный от канала и сопла головки, а анодом может служить сопло или изделие.

Плазменная струя образуется в канале горелки и стабилизируется стенками канала и холодным газом, отделяющим столб дуги от этих стенок. Сравнительно малый диаметр и достаточная длина канала обеспечивают требуемую для стабилизации плазменного столба скорость газового потока. В существовании стабилизирующего канала и заключается основное отличие плазмотрона от обычной горелки для сварки в защитных газах.

В качестве плазмообразующего материала обычно применяют газы (аргон, азот, гелий, водород, воздух и их смеси), что обеспечивает температуру плазмы до 50000 К.

Преимущества плазменной сварки состоят в следующем :

1. По сравнению с аргонодуговой плазменная сварка отличается более стабильным горением дуги, при этом обеспечивается более равномерное проплавление кромок.
2. По проплавляющей способности плазменная дуга занимает промежуточное положение между электронным лучом и дугой, горящей в аргоне.
3. Способ дуги и струя плазмы имеют цилиндрическую форму, поэтому площадь поверхности металла, через которую осуществляется теплопередача, не зависит от расстояния между электродом горелки и изделием.
4. Благодаря цилиндрической форме столба дуги плазменно-дуговая сварка менее чувствительна к изменению длины дуги, чем аргонодуговая. Плазменная сварка позволяет иметь практически постоянный диаметр пятна и дает возможность стабилизировать проплавление основного металла.

Плазменная сварка, также как и многие другие методы сварки, наряду с преимуществами имеет и свои недостатки:

1. Недостаточная плотность мощности в зоне обработки.
2. Невозможность достичь стабилизации дуги при высоких скоростях сварки.

Путем совместного воздействия на образование сварочной ванны лазерного луча и плазменной струи реализуется комбинированный лазерно-плазменный процесс сварки. Такая комбинация приводит к улучшению пространственной стабилизации пятна дуги на поверхности металла и повышению устойчивости ее горения при малых токах и больших скоростях перемещения. Одновременно происходящий нагрев металла плазмой приводит к локальному повышению температуры в зоне нагрева и, как следствие, изменению оптических свойств поверхности и соответственно к увеличению коэффициента поглощения лазерного излучения. В итоге эффективность лазерной сварки возрастает, что особенно важно при использовании лазеров небольшой мощности. Все это позволя-

ет, с одной стороны увеличить скорость и стабильность плазменной сварки, а с другой – повысить эффективность и снизить себестоимость лазерной сварки.

Если лазерное излучение проходит через плазму дуги, то наблюдается изменение полного энергетического баланса дугового разряда, связанное с дополнительным выделением энергии в объеме дуговой плазмы, вследствие поглощения лазерного излучения. В том случае когда мощность, вносимая в дугу лазерным пучком, соизмерима с ее электрической мощностью, реализуется промежуточный (между оптическим и дуговым) тип газового разряда – комбинированный лазерно-дуговой разряд. Интегральные и особенно локальные характеристики плазмы такого разряда существенно отличаются от соответствующих характеристик исходной сжатой дуговой плазмы.

Характеристики лазерного излучения также претерпевают существенные изменения в результате поглощения и рефракции лазерного излучения в плазме разряда. В результате энергия, вводимая в свариваемую деталь, не сводится к простой сумме энергокладов лазерного и дугового источников тепла, взятых в отдельности.

В лазерно-плазменном разряде происходит существенное изменение, по сравнению с плазменным разрядом, температуры, газодинамического давления, распределения интенсивности лазерного излучения вдоль оптической оси, вольтамперные характеристики разряда.

Поглощение лазерного излучения дуговой плазмой приводит к существенному повышению температуры ее центральных областей, причем максимально достижимые значения  $T$  увеличиваются с ростом мощности пучка  $P$ . Отмеченный рост температуры плазмы способствует повышению ее электропроводности и, как следствие, увеличению плотности тока в приосевой зоне разряда. Таким образом, разряд, генерируемый лазерно-дуговым плазмотроном, характеризуется повышенной концентрацией тепловой и электрической энергии в той области плазмы, которая подвергается воздействию лазерного пучка и жестко связана с его осью, а также высокой пространственной стабильностью этой области (рис. 37).

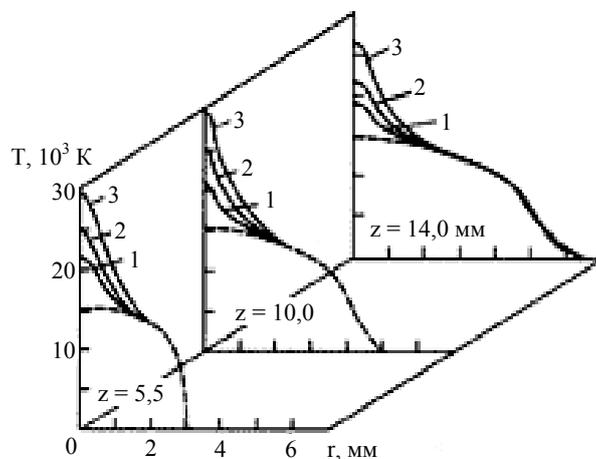


Рис. 37. Пространственные распределения температур плазмы разряда в лазерно-дуговом плазмотроне ( $I=200A$ ) при мощности лазерного пучка:

1 кВт (1), 2 кВт (2), 3 кВт (3). 0 кВт (штриховая кривая)

$r$  – расстояние от оси лазерного луча

$Z$  – расстояние от среза катода

Описанное изменение теплового режима горения плазменной дуги, под воздействием лазерного излучения, вызывает существенное перераспределение газодинамических характеристик потока плазмы при увеличении  $P$ . Одной из основных причин этого является снижение вязкости аргоновой плазмы при повышении температуры. Другой причиной является упомянутое выше перераспределение плотности тока в разряде, усиливающее роль электромагнитных сил в ускорении плазменного потока. В результате аксиальная компонента скорости плазмы на оси разряда заметно увеличивается. Несмотря на возрастание скорости, снижение плотности плазмы при повышении температуры приводит к тому, что газодинамическое давление плазменного потока в приосевой зоне комбинированного разряда несколько уменьшается. Следует отметить, что это снижение, вызывающее уменьшение динамического воздействия на поверхность расплавленного металла, важно для процесса наплавки с использованием лазерно-дугового плазмотрона.

Происходящее в рассматриваемом плазмотроне взаимодействие лазерного излучения с дуговой плазмой приводит к перераспределению не только ее характеристик, но и самого лазерного пучка (за счет поглощения и рефракции в плазме разряда). Так, например, поглощение лазерного излучения приводит к тому, что на расстоянии 20 мм от среза катода мощность пучка для рассматриваемых условий составляет всего около 30 % от его исходной мощности  $P$ , тогда как интенсивность излучения на его оси возрастает при этом более чем в два раза (рис. 38).

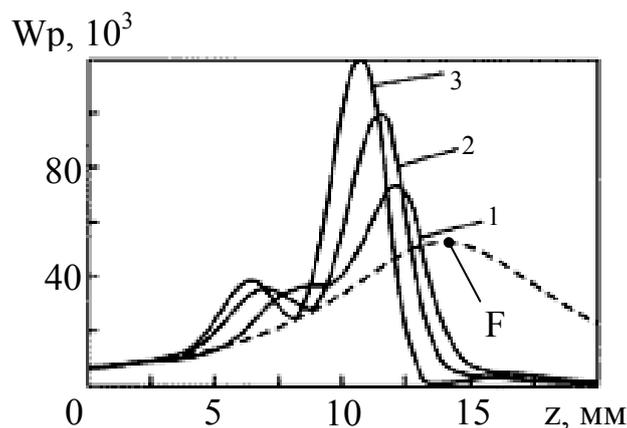


Рис. 38. Распределение плотности мощности лазерного излучения вдоль оси комбинированного разряда ( $P=3\text{кВт}$ ) при токе дуги: 100 (1), 200 (2), 300 А (3), штриховая кривая - без плазменной дуги

Таким образом, взаимодействие лазерного пучка с плазмой комбинированного разряда вызывает его дополнительное фокусирование, усиливающееся с ростом тока и мощности луча лазера.

Следовательно, варьируя этими двумя параметрами, можно эффективно управлять фокусированием пучка в плазме комбинированного разряда, создаваемого с помощью лазерно-дугового плазматрона, что важно при использовании подобных устройств для сварки и резки.

Вольт-амперные характеристики разряда с использованием медного водоохлаждаемого анода при различных значениях мощности луча и так плазматрона показаны на рис. 39,а. Видно, что под воздействием лазерного пучка напряжение на дуге уменьшается, причем основное его падение происходит при мощности лазера  $P < 2,5$  кВт. Что касается самой плазменной дуги, то под воздействием лазерного излучения она несколько сжимается, что можно наблюдать визуально или по возрастающим вольт-амперным характеристикам разряда (рис. 39, б).

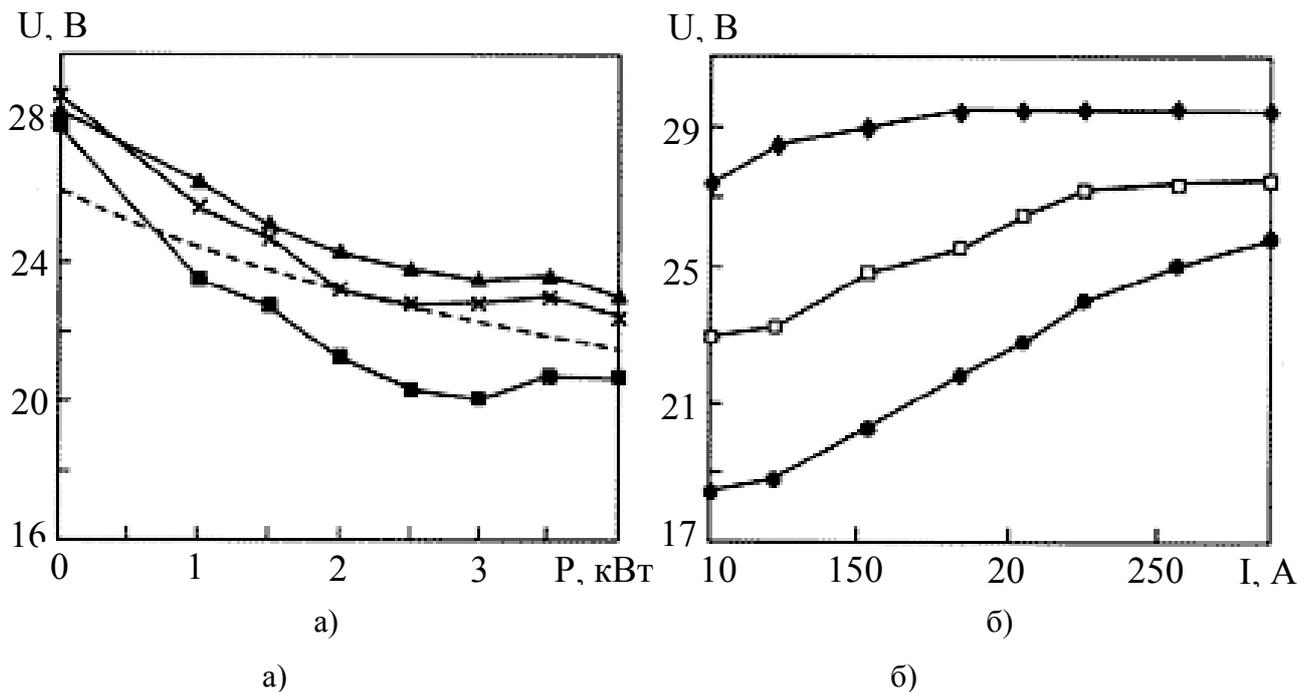


Рис. 39. Зависимость напряжения на разряде в лазерно-дуговом плазматроне от мощности  $P$  (а) и тока  $I$  (б):  $\blacksquare$  -  $I_a=150$ ,  $\times$  - 200,  $\blacktriangle$  - 250А;  $\blacklozenge$  -  $P=0$ ,  $\square$  - 1,  $\circ$  - 3кВт; штриховая линия - расчетные данные при  $I=200$ А

Исследования показали, что соосное объединение плазменной дуги с лазерным пучком в лазерно-дуговом плазматроне дает возможность за счет улучшения пространственной стабильности горения дуги повысить скорость сварки в 2...3 раза по сравнению с обычной плазменной сваркой.

Кроме того, отмеченное выше уменьшение напряжения на дуге в комбинированном процессе снижает опасность двойного дугообразования, что особенно важно при работе на больших токах (более 300 А). Это является предпосылкой для повышения производительности процесса сварки за счет увеличения тока дуги.

Дальнейшее развитие лазерных и плазменных способов сварки было направлено на создание интегрированных лазерно-дуговых плазматронов.

Существуют различные схемы реализации интегрированных плазмотронов на основе соосного объединения лазерного луча и плазменной дуги. Отличительная особенность таких устройств – конструкция катодного узла, позволяющая вводить лазерный луч в дуговую плазму вдоль оси плазмформирующего канала.

По аналогии с дуговыми, интегрированные плазмотроны могут быть прямого (рис. 40, а) и косвенного (рис. 40, б) действия, причем последние можно разделить на плазмотроны с самоустанавливающейся либо с фиксированной длиной дуги. Интегрированные плазмотроны прямого действия могут использоваться для лазерно-плазменной сварки, наплавки и резки металлов, а косвенного действия – для обработки диэлектрических материалов, закалки металлических поверхностей, нанесения покрытий и ведения других технологических процессов.

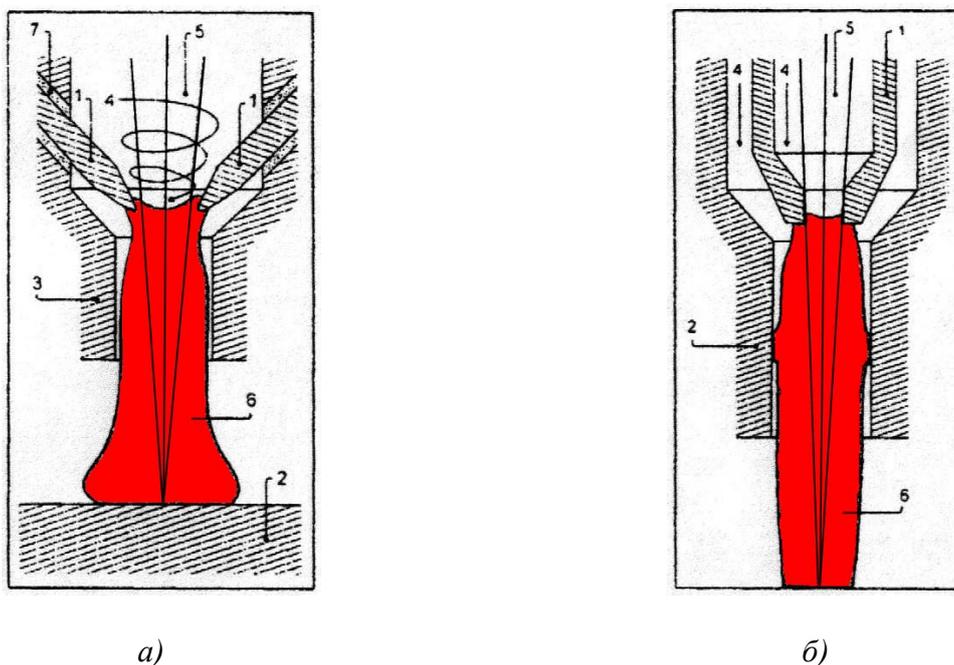


Рис. 40. Схемы интегрированных плазмотронов прямого (а) и косвенного (б) действия:

- 1 – катод; 2 – анод; 3 – плазмформирующее сопло; 4 – плазмообразующий газ;  
5 – лазерный пучок; 6 – плазма; 7 – изолятор

В зависимости от расхода плазмообразующего газа лазерно-дуговые плазмотроны можно разделить на работающие в ламинарном или турбулентном режиме течения газа. Также как в дуговых плазмотронах, в них можно использовать различные способы пространственной стабилизации разряда (например, вихревую газовую стабилизацию). При выборе способа стабилизации следует помнить, что за счет воздействия на дуговую плазму пучка излучения  $\text{CO}_2$ -лазера в ней формируется высокотемпературная токопроводящая область, жестко связанная с осью пучка. Это само по себе делает комбинированный разряд пространственно более стабильным, чем дуговой.

Основные преимущества лазерно-плазменной сварки проявляется в следующем:

- значительно повышается скорость сварки, при этом скорость сварки становится выше, чем просто арифметическое сложение скорости лазерной и плазменной сварки;
- процесс практически не зависит от оптических свойств поверхности;
- при лазерно-плазменной сварке алюминиевых сплавов происходит очистка поверхности от окисной пленки  $Al_2O_3$ ;
- при лазерно-плазменной сварке происходит снижение температуры поверхности ванны расплава, при которой начинается переход от теплопроводного режима проплавления к режиму глубокого проплавления.

Разработана технология для скоростной лазерно-микроплазменной сварки тонколистовых алюминиевых сплавов, основанные на совместном использовании лазерного пучка малой мощности и микроплазменной дуги обратной полярности. Предложенный способ позволяет производить очистку поверхности алюминия от окисной пленки в процессе сварки, чего нельзя достичь при лазерной сварке, стабилизировать движение дуги при больших, по сравнению с микроплазменной, скоростях сварки, а также существенно повысить эффективность использования энергии лазерного излучения и электрической дуги. При сварке алюминиевого сплава АМг-2 толщиной 0,35 мм с током дуги 22 А и мощностью лазерного пучка 250 Вт удается достичь скорости сварки 9 м/мин с хорошей очисткой поверхности и полным проплавлением образца, при этом ширина швов составляет 1,0...1,2 мм. Следует отметить, что использование только лазерной или только микроплазменной сварки не позволяет производить сварку данного металла даже на скорости 3 м/мин.

Использование внешнего ионизатора – плазменной струи, при лазерной сварке без образования плазменного факела, позволяет снизить температуру поверхности ванны расплава, при которой начинается переход от теплопроводного режима проплавления к более эффективному режиму глубокого проплавления. Это является одной из основных причин более высокой эффективности лазерно-плазменной сварки по сравнению с лазерной.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### Основная литература

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н. Лазерная сварка металлов. – М.: Высшая школа, 1988. – 207с.
2. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов. - М.: Мир. 1986 г. 488 с.
3. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки металлов. М.: Машиностроение . 1989 г. 301 с.

### Дополнительная литература.

1. Горный С.Г., Лопота В.А., Редозубов В.Д. Особенности нагрева металла при лазерно-дуговой сварке. Автоматическая сварка. № 1 , 1989 г. стр. 73-74.
2. Патон Б.Е. и др. Гибридная лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин. Автоматическая сварка №3, 2002 г. с 5-9.
3. Кривцун И.В. Особенности проплавления металла при лазерно-дуговой сварке с использованием ИАГ-лазера. Автоматическая сварка № 12 2001 г. стр.33-36.
4. Фролов В.А. Конструктивно-технологические особенности создания сварных металлических конструкций с применением светолучевой сварки. Сварочное производство. №3, 1998 г. с.8-12.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение.....	4
1. Технологические особенности лазерной сварки.....	5
1.1. Поглощение лазерного излучения обрабатываемой поверхностью.....	5
1.2. Термические циклы лазерной сварки.....	7
1.3. Процессы порообразования при лазерной сварке.....	8
1.4. Гидродинамическая неустойчивость ванны расплава при высоких скоростях лазерной сварки.....	9
1.5. Требования к геометрии сборки свариваемых деталей.....	10
1.6. Требования к стабильности диаграммы направленности лазерного излучения.....	11
1.7. Техничко-экономическая эффективность лазерной сварки.....	12
2. <b>Лазерно-дуговая сварка</b> .....	14
2.1. Основные энергетические характеристики процесса лазерно-дуговой сварки.....	15
2.2. Электрические характеристики дуги при лазерно-дуговой сварке....	19
2.3. Особенности формирования геометрии шва при лазерно-дуговой сварке.....	21
2.4. Особенности технологического процесса лазерно-дуговой сварки.....	23
2.5. Технологическая подготовка производства при лазерно-дуговой сварке.....	25
2.3. Техничко-экономическая эффективность лазерно-дуговой сварки... ..	26
3. <b>Гибридная лазерно-светолучевая сварка</b> .....	48
4. <b>Двухлучевая лазерная сварка</b> .....	28
4.1. Технологические особенности двухлучевой лазерной сварки.....	29
5. <b>Гибридная лазерно-индукционная сварка</b> .....	37
6. <b>Гибридная лазерно-плазменная сварка</b> .....	40
Список рекомендуемой литературы.....	47
Содержание.....	48