

## 1.1 Плазменная сварка

### Сущность плазменной сварки, схема плазмотрона

При плазменной сварке источником нагрева служит высокотемпературная дуговая плазма, которую получают с использованием дуговых плазмотронов. Плазмотроны могут быть косвенного и прямого действия (рис. 6.4).

Если используется только источник питания дугового разряда, подключенный к токоподводящему мундштуку (катод) и корпусу плазмотрона (анод), то это будет плазмотрон косвенного действия. В полость плазмотрона подается плазмообразующий газ (аргон, гелий, азот, пары воды). Между вольфрамовым электродом и корпусом плазмотрона 3 в выходном канале плазмотрона с помощью искрового разряда (от осциллятора) зажигается дуга. Образуется дуговая плазма плазмообразующего газа, которая выдувается через выходное отверстие плазмотрона и используется для нагрева материала.

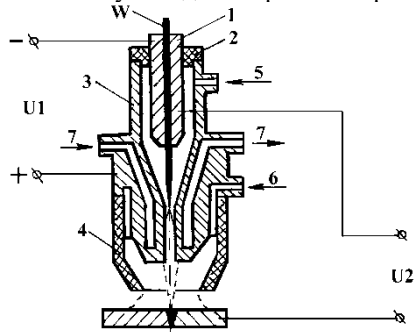


Рис. 6.4. Схема плазмотрона:

1 - токоподводящий мундштук; 2 - изоляционная втулка; 3 - медный корпус; 4 - защитное сопло; 5- подача плазмообразующего газа; 6 - подача защитного газа; 7 - охлаждающая вода; W - вольфрамовый электрод

Плазмотрон косвенного действия может быть использован для пайки, сварки термической резки, напыления как металлов, так и неметаллов (пластмассы, стекла, керамики, гранита, бетона). Плазмотрон прямого действия наряду с плазмообразующим источником питания небольшой мощности подключается к источнику питания большей мощности. Напряжение этого источника подключается к токоподводящему мундштуку и изделию из электропроводного материала для получения основного дугового разряда прямой или обратной полярности, или дуги переменного тока частотой 50 Гц, или импульсной дуги. В этом случае плазмообразующая дуга небольшой мощности (дежурная дуга) используется для стабилизации и поддержания основного дугового разряда.

Если источник плазмообразующей дуги (дежурной дуги) отсутствует и используется только основной источник питания дугового разряда, то такие устройства называются дуготронами.

Дуговая плазма плазмотронов и дуготронов имеет существенные отличия от дуговой плазмы свободно горящей дуги. Если температура свободно горящей дуги  $T \approx 6000^\circ\text{C}$ , то температура дуговой плазмы на выходе плазмотрона может достигать  $50000^\circ\text{C}$ .

Температура дуговой плазмы зависит от состава плазмообразующего газа, давления плазмообразующего газа, условий дугового разряда в выходном канале плазмотрона. Стенки этого канала, охлаждаемые проточной водой, понижают температуру периферийных слоев потока плазмы, повышая их электрическое сопротивление. Дуговой разряд стягивается к оси выходного отверстия плазмотрона (дуга отшнуровывается), плотность тока повышается, температура плазмы существенно увеличивается. С повышением давления плазмообразующего газа температура плазмы также повышается.

Зависимость максимальной температуры плазмы от состава плазмообразующего газа показана в таблице.

Газ	Азот	Аргон	Гелий	Пары воды
$T_{\text{плазмы}}, ^\circ\text{C}$	80000	15000	2000	50000

Таким образом, дуговая плазма плазмотронов является высокотемпературным источником нагрева, позволяющим не только расплавить, но испарить самые тугоплавкие металлы и материалы.

Коэффициент полезного действия  $\eta$  зависит от типа плазмотрона. Для плазмотронов косвенного действия  $\eta = 30 \dots 50\%$ , для плазмотронов прямого действия  $\eta = 70 \dots 90\%$ .

Плотность теплового потока плазмы  $q_{\text{пл}}$  существенно выше плотности теплового потока свободно горящей дуги  $q_{\text{д}}$ , ( $q_{\text{пл}} = 3 \dots 10 q_{\text{д}}$ ),  $q_{\text{пл}}$  зависит от типа плазмотрона, мощности дугового разряда, устройства плазмотрона и от других факторов.

Диапазон мощности оборудования для плазменной сварки, термической резки, напыления очень широк: от плазмотронов для микроплазменной сварки деталей толщиной  $0.1 \dots 2$  мм до мощных плазмотронов, позволяющих плавить или резать материалы толщиной до 500 мм. Так мощные плазмотроны

могут иметь сверхзвуковое истечение плазмы. В мощных плазмотронах вместо вольфрамового стержня используется медный водоохлаждаемый катод с металлокерамической вставкой, состоящей из материалов с большой термоэлектронной эмиссией (гексоборид лантана, гафний+лантан).

### Область применения плазмотронов, достоинства и недостатки плазменной сварки

Дуговые плазмотроны применяются для сварки, пайки, термической резки, напыления жаропрочных, теплоустойчивых сплавов, тугоплавких металлов (титана,  $T_{пл}=1660^{\circ}\text{C}$ ; циркония,  $T_{пл}=1855^{\circ}\text{C}$ ; хрома,  $T_{пл}=1930^{\circ}\text{C}$ ; молибдена,  $T_{пл}=2622^{\circ}\text{C}$ ; тантала,  $T_{пл}=2996^{\circ}\text{C}$ ; вольфрама,  $T_{пл}=3410^{\circ}\text{C}$ ), для сварки и пайки неэлектропроводных материалов (пластмассы, стекла, керамики, металлокерамики, композитных материалов), термической резки неметаллов (пластмассы, стекла, керамики, бетона), для термической резки металлов и сплавов, для которых малопригодна термическая газовая резка (нержавеющие стали, высоколегированные стали, алюминиевые сплавы, магниевые сплавы, медные сплавы).

По сравнению с дуговой сваркой плазменная сварка обеспечивает более глубокое проплавление, более узкий шов, возможность сварки более толстых деталей без разделки кромок стыка, и как следствие – уменьшение сварочных напряжений и деформаций, уменьшение зоны термического влияния, более высокую производительность, малую чувствительность к колебаниям длины дуги.

По сравнению с дуговой сваркой плазменная сварка имеет более низкий КПД, более сложное и дорогое оборудование.

## 1.2 Электронно-лучевая сварка

Электронно-лучевая сварка впервые разработана в 1952 году во Франции. Источником нагрева служит электронный луч, который получают в глубоком вакууме с использованием электронно-лучевых пушек. Схема установки для сварки электронным лучом показана на рис. 8.1.

Катод пушки изготовляют из металлокерамики (гексоборида лантана), обладающей большой термоэлектронной эмиссией. Катод нагревают от электрической спирали или используют высокочастотный индуктор.

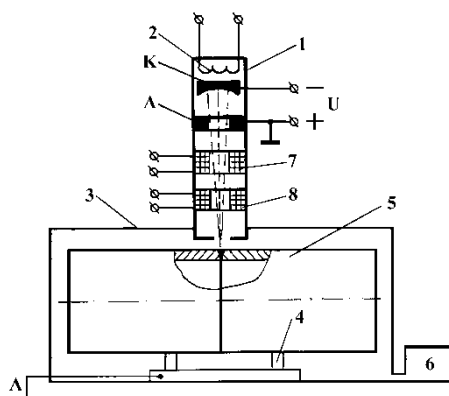


Рис.8.1. Схема установки для сварки электронным лучом:

1 - электронно-лучевая пушка; 2 - система нагрева катода; 3 - вакуумная камера; 4 - механизм перемещения изделия; 5 - свариваемое изделие; 6 - вакуумный насос; К - катод; А - анод; 7 - фокусирующая система (ФС); 8 - отклоняющая система (ОС); U - ускоряющее напряжение

Между катодом и анодом прикладывается высоковольтное напряжение. Электроды, излучаемые нагретым катодом, разгоняются до большой скорости, которая зависит от величины ускоряющего напряжения,

$$U_e = \frac{m_e V_e^2}{2}, \quad V_e = \sqrt{\frac{2e_e U}{m_e}} \approx 600\sqrt{U} \quad \text{км/с}, \quad e_e = 1.6 \cdot 10^{-19} \quad \text{К},$$

$$m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \quad \text{г}.$$

Ускоряющее напряжение может лежать в пределах 5÷500 кВ. В зависимости от ускоряющего напряжения электронно-лучевые пушки делятся на низковольтные ( $U=5\div 15$  кВ), пушки со средним ускоряющим напряжением ( $U=15\div 60$  кВ), высоковольтные пушки ( $U>60$  кВ).

К настоящему времени созданы электронно-лучевые пушки (США) с одиннадцатью ступенями ускорения и суммарным ускоряющим напряжением 500 кВ. При высоких U скорость электронов соизмерима со скоростью света. При столкновении электронов с поверхностью металла в случае полной

отдачи своей кинетической энергии металл получит тепловую энергию  $Q = \frac{m_e V_e^2}{2} n$ , где  $n$  - число электронов.

Ток электронного луча  $I_e$  обычно не превышает 1000 мА, но есть пушки, где  $I_e = 3 \div 5$  А. Мощность пушки  $W = I_e U$ . В настоящее время достигнута мощность пушки 300 кВт (США).

При столкновении с поверхностью металла электрон теряет свою энергию, осуществляя некоторый пробег в глубь металла. Длина этого пробега определяется уравнением  $\delta = 2.1 \cdot 10^{-12} U^2 / \rho$  (см), где  $\rho$  - плотность вещества, г/см<sup>3</sup>. Длина пробега  $\delta$  в металле небольшая и составляет доли миллиметра. На участке пробега кинетическая энергия электрона превращается в тепловую с небольшими потерями, КПД составляет 80 ÷ 98%.

При помощи фокусирующей системы электронный луч можно сфокусировать на малую площадку, равную нескольким мкм<sup>2</sup>. При этом можно достигнуть высокой удельной мощности  $q_F = W/F = 10^{-5}$  Вт/мм<sup>2</sup>. Максимальная плотность энергии достигается по оси электронного луча. При удалении от оси луча плотность энергии уменьшается по закону нормального распределения.

В зоне действия электронного луча в металле образуется конусообразный кратер, глубина которого зависит от мощности излучения и ускоряемого напряжения. Образование кратера по глубине прекращается при выравнивании плотности энергии луча по боковым стенкам кратера вследствие увеличения площади боковой поверхности кратера.

При перемещении электронного луча по поверхности металла передняя стенка кратера оплавляется, расплавленный металл оттесняется на заднюю стенку кратера и там кристаллизуется. В результате получают сварной шов с глубоким проплавлением и малой ширины. Такой шов называют кинжальным (рис. 8.2). При полном проплавлении детали толщиной  $\delta$  и шириной шва  $b$  соотношение  $\delta/b = 10 \div 50$ . Соотношение  $\delta/b$  увеличивается по мере роста плотности энергии электронного луча  $q_F$  и ускоряющего напряжения  $U$ .

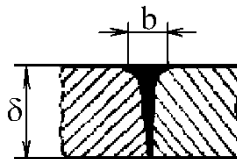


Рис. 8.2. Схема кинжального шва

При помощи отклоняющей системы ОС можно управлять электронным лучом на поверхности детали, перемещая его в нужном направлении. При неподвижной детали электронный луч может перемещаться, сваривая шов нужной конфигурации (окружность, овал, прямоугольник и т.д.).

ОС может также сканировать электронный луч по всей поверхности нагреваемой детали (также как по экрану телевизора). Такой процесс развертки луча используется, например, при пайке в вакууме сотовых панелей из титанового сплава для крыла ракеты (США).

Но обычно ОС используется для точного наведения электронного луча на свариваемый стык при перемещении свариваемого изделия в вакуумной камере. При этом используют компьютерные следящие системы с применением ультразвуковых, электромагнитных датчиков.

В вакуумной камере должен быть вакуум, в котором длина свободного пробега электронов должна быть больше расстояния от катода до поверхности свариваемого изделия. Обычно в камерах создают вакуум с  $P < 0.01$  МПа. Мощность вакуумных насосов выбирают в зависимости от размеров вакуумной камеры исходя из условия, что необходимый вакуум насосы должны создать примерно за 20 ÷ 60 мин.

### 1.2.1 Оборудование для электронно-лучевой сварки

Наибольшее распространение получили универсальные электронно-лучевые установки с относительно небольшими вакуумными камерами с объемом не более 1 м<sup>3</sup>. Так в бывшем СССР в самолетостроении применялось до 30 типов универсальных установок, на которых сваривались узлы и детали из 20 материалов, за год сваривалось до 20 тыс. швов.

Электронно-лучевые установки применяются для сварки химически активных металлов (молибден, лантан, вольфрам, титановые, алюминиевые сплавы); для резки, пробивки отверстий, для электронно-лучевой пайки, для сварки разнородных металлов, термообработки в вакууме, электронно-лучевого перепада при получении высококачественных металлов и сплавов, для сварки вакуумплотных сварных швов).

Основные области применения электронно-лучевой сварки: изготовление атомных реакторов, космической и ракетной техники, самолетостроения и авиадвигателестроения.

Кроме универсальных электронно-лучевых установок в мире применяются примерно 10000 установок, имеющие крупногабаритные вакуумные камеры с мощными электронно-лучевыми пушками. Чтобы оценить возможности электроннолучевой сварки по свариваемой толщине можно пользоваться таким соотношением. Для сварки деталей толщиной 1 мм требуется мощность примерно 1 кВт. Таким образом, в настоящее время имеется возможность сваривать детали с толщиной стенки до 300 мм за 1 проход.

В мире создано несколько уникальных установок для электроннолучевой сварки с большими вакуумными камерами.

Так во Франции разработана установка с вакуумной камерой объемом 100 м<sup>3</sup>, оснащенной пушкой W=200 кВт. Установка предназначена для сварки узлов атомных и тепловых электростанций массой 55 т из сталей, титановых сплавов, алюминиевых сплавов. В Японии создана установка с объемом камеры 265 м<sup>3</sup>. Внутри камеры - поворотный стол диаметром 3.5 м, высота его перемещения - 5.5 м, грузоподъемность - 30 т.

В США имеется установка с вакуумной камерой объемом 500 м<sup>3</sup>, с пушками W=60 кВт, U=175 кВ, расстояние перефокусировки электронного луча от 50 мм до 18000 мм. Вакуумная камера изготовлена из нержавеющей стали, толщина стенки камеры - 25 мм, масса камеры - 10 т. Установка оснащена комплексом следящих систем и ЭВМ, обеспечивающим точное наведение электронного луча на свариваемый стык при сварке крупногабаритных изделий, отклонение луча от стыка составляет  $\pm 0.025$  мм. Стоимость установки - \$2.5 млн.

В США создана электронно-лучевая пушка с ускоряющим напряжением 500 кВ. При W=100 кВт пушка может сваривать в один проход изделия из нержавеющей стали с толщиной стенки  $\delta=200$  мм со скоростью 100 мм/мин, при мощности пушки 50 кВт -  $\delta=130$  мм, скорость сварки - 400 мм/мин.

В бывшем Советском Союзе разработаны уникальные установки для электронно-лучевой сварки узлов летательных аппаратов.

Установка ЭЛУ-24×8 имеет вакуумную камеру объемом 800 м<sup>3</sup>, размеры свариваемого изделия с оснасткой 9×3.5×3.5 м, масса изделия 20 т. В вакуумной камере установлен перемещающийся стол в продольном направлении на 10.5 м, в поперечном направлении на 4.5 м, вертикальное перемещение стола 3.3 м.

Установка оснащена электронно-лучевыми пушками с U=60 кВ, W=60 кВт и с U=120 кВ, W=100 кВт. Установка позволяет сваривать изделия из титановых сплавов толщиной 130 мм со скоростью сварки 10-90 м/час. Габаритные размеры установки - 36.5×23.5×1.9 м, масса установки - 1100 тонн, время подготовки вакуума - 60 мин.

Установка ЭЛУ-24×16 имеет вакуумную камеру объемом 1350 м<sup>3</sup>. Максимальные габариты изделия с оснасткой - 17×3.5×3.5 м. Суммарная масса изделия с оснасткой - 40 тонн.

Перемещение стола: продольное - 18.5 м, поперечное - 8 м, вертикальное - 1.5 м. Установка оснащена электронно-лучевыми пушками с U=120 кВ, W=100 кВт и с U=60 кВ, W=60 кВт. Пушки могут перемещаться в камере в поперечном направлении на 4.5 м, по высоте - на 3.5 м. Габаритные размеры установки - 77×24.8×13.3 м, масса установки - 2000 тонн, время подготовки вакуума - 90 мин.

При сварке крупных партий изделий важно уменьшить время подготовки вакуумной камеры к работе. Для этого применяют многосекционные вакуумные камеры, где на входе и выходе рабочей вакуумной камеры, в которой выполняется электронно-лучевая сварка, установлены шлюзные вакуумные камеры.

При сварке мелких деталей можно применять загрузку и выгрузку деталей в рабочую камеру без существенного нарушения вакуума, используя пеналы с гладкими полированными стенками. В рабочей камере детали из пеналов перегружаются автоматом на конвейер или поворотный стол и подаются на позицию сварки. В последнее время для этих операций используются робототехнические комплексы.

В последние годы ведутся работы по выводу электронно-лучевого луча из электронно-лучевой пушки в открытую атмосферу. Для этого на выходе пушки устанавливается многосекционная вакуумная камера. Каждая секция, имеющая маленький объем, подключается к мощному вакуумному насосу. Вакуумные насосы обеспечивают откачку воздуха, поступающего через выходное отверстие для электронного луча. Таким образом, в электронно-лучевой пушке и в полостях вакуумных камер создается необходимый вакуум, обеспечивающий длину пробега электронов от катода пушки до выходного отверстия на торце вакуумной камеры. Электронный луч в этом случае используется как обычный источник нагрева, которым можно вести сварку на воздухе, в защитных газах или в камерах с неглубоким вакуумом (0.1 МПа), обеспечивающим качественную защиту, например, при сварке титановых сплавов.

Такие установки созданы в США, используются они в автомобилестроении, позволяют сваривать детали толщиной до 10 мм. Ведутся работы по созданию установок для сварки деталей толщиной 20...60 мм (W=20...60 кВт).

Космонавтика поставила широкий круг задач перед сварочной наукой по созданию технологии сварки, термической резки и пайки в условиях космоса специальных легких и жаропрочных сталей для ремонта космических аппаратов, орбитальных станций, монтажа различных металлоконструкций. Исследования показали, что в условиях невесомости и космического вакуума из всех способов сварки плавлением наиболее пригодны электронно-лучевая и лазерная сварка, так как только в узком кинжальном шве можем удержаться расплавленный металл за счет сил поверхностного натяжения. Впервые в мире

сварку в условиях космоса провели на космическом корабле «Союз –6» космонавты В. Кубасов и Г. Шонин в октябре 1969 года на установке «Вулкан», которую разработали в Киевском институте электросварки. Сварка электронным лучом показала хорошие результаты. В 1984 году космонавты испытывали в открытом космосе малогабаритный универсальный электронно–лучевой пистолет для сварки, пайки и напыления. Киевские ученые продолжают исследования и разработки в области электронно-лучевой сварки в условиях космоса, в том числе по совместной украинско-американской программе.

### 1.2.2 Достоинства электронно-лучевой сварки

Электроннолучевая сварка открывает широкие возможности для применения новых типов сварных швов, создания новых сварных конструкций, которые существенно расширяют область применения сварки плавлением.

Возможность получения сварного шва минимального сечения (кинжальный шов) обеспечивает малую зону термического влияния, существенное уменьшение нарушения структуры металла, уменьшение сварочных напряжений и деформаций, сохранение размеров изделия, экономию электроэнергии (15% дуговой сварки), возможность сварки в открытом космосе в условиях невесомости.

Возможность сварки химически активных металлов в вакууме и сохранения химического состава сварного шва, сварки разнородных металлов, сварки в труднодоступных местах, доступа к зоне сварки через узкие зазоры и щели (например, сварка вала турбины с набранными лопатками), изменения фокусного расстояния при сварке сварных швов на различных уровнях. Возможность сварки прорезными швами при одностороннем доступе к зоне сварки.

### 1.2.3 Недостатки электронно-лучевой сварки

Наличие рентгеновского излучения при торможении потока электронов на поверхности металла. Излучение усиливается по мере роста ускоряющего напряжения. Для защиты от рентгеновского излучения вакуумные камеры внутри снабжены защитным слоем (свинцовые экраны).

При мощном рентгеновском излучении установка должна быть размещена в отдельном помещении, специально оборудованном в соответствии с требованиями техники безопасности.

К недостаткам можно также отнести длительное время подготовки вакуумной камеры к работе, сложность оборудования, необходимость полной автоматизации всех работ в вакуумной камере, высокая стоимость оборудования, высокая квалификация обслуживающего персонала.

## 1.3 Лазерная сварка

При этом виде сварки источником нагрева служит луч света, который получают в оптическом квантовом приборе, получившем название лазер. Появление лазеров является замечательным достижением науки в области квантовой электроники, основы которой были заложены советскими и американскими учеными.

Впервые вопрос о квантовом взаимодействии между светом и средой был рассмотрен А. Эйнштейном в 1917 году, который показал возможность стимулированного излучения при переводе среды в неравновесное состояние.

В 1939-1940 годы советский ученый В.А. Фабрикант указал на возможность усиления света за счет стимулированного излучения и теоретически сформулировал необходимые для этого условия. В 50-х годах он с сотрудниками экспериментально подтвердил результаты расчетов.

В 1952 г. одновременно в Советском Союзе и США предложен новый принцип генерации и усиления излучения, и на этом принципе создан молекулярный генератор, сантиметрового диапазона (1954-1955 гг.). В 1957 г. А.Г. Басовым и А.М. Прохоровым создан молекулярный генератор, работающий по трехуровневой схеме. В 1957-1958 гг. появились работы Н.Г. Басова, Б.М. Вула, О.Н. Крохина, Ю.М. Попова, Ч. Таунса, А. Шавлова, показывающие на возможность создания квантового генератора оптического диапазона (лазера).

Первый лазер на кристалле искусственного рубина создан в 1958 г. в США. В этом же году создан первый газовый лазер на гелий-неоновой смеси. В 1962 одновременно в СССР и США был создан полупроводниковый лазер. В 1963-1964 гг. были созданы приборы, в которых в качестве источников излучения использовались лазеры для различных целей, в том числе сварочные и сверлильные аппараты. В 1964 г. советским ученым Н.Г. Басову, А.М. Прохорову и американскому ученому Ч. Таунсу была присуждена Нобелевская премия за фундаментальные исследования в области квантовой электроники, послужившие базой для создания оптических квантовых генераторов - лазеров.

В последующие годы шло бурное развитие лазерной техники. Были созданы твердотельные и газовые лазеры, дающие излучения с длиной волны от инфракрасного до ультрафиолетового диапазона с длиной волны  $\lambda=0.1\div 100$  мкм (видимый диапазон волн  $\lambda=0.76\div 0.4$  мкм), на различных твердых рабочих телах (рубине, стекле с радиоактивными добавками, пластмассах с иттрием, европием, фториде кальция, алюмоиттриевом гранате с ниодимом и др.); на газах (неон+гелий, аргон+кислород, ксенон, криптон, углекислый газ и др.).

Лазерные установки применяются для сварки, резки, сверления, пайки, оптической локации. Разработаны лазерные дальномеры, прицелы, лазерная медицинская техника, лазерное оружие.

Для сварки, термической резки и сверления применяют твердотельные лазеры (лазеры на рубине, АИГ-лазеры) и газовые лазеры на углекислом газе, работающие в импульсном или непрерывном режиме.

### 1.3.1 Свойства лазерного излучения

Ученые доказали, что при использовании обычного источника света (солнца, электрической лампы, дуги) его излучение невозможно сфокусировать фокусирующим устройством (каким бы оно совершенным не было) и получить в фокусе плотность энергии большую, чем у поверхности источника, т.е. яркость луча в фокусе не может быть больше яркости первоначального источника.

Обычные источники света имеют в видимой области широкий спектр частот излучения (длины волн лежат в пределах  $\lambda=0.4\div 0.76$  мкм). Известно, что угол преломления луча зависит от длины волны, поэтому лучи с различной длиной волны фокусируются не в точке, а в фокусной области вдоль оси фокусирующего устройства.

Луч лазера отличается высокой монохроматичностью. Ширина линии излучения составляет  $10^{-6}\div 10^{-10}$ , что позволяет сфокусировать луч лазера в точечном объеме пространства.

Луч лазера имеет значительную спектральную яркость. Обычные источники света независимо от их температуры, не могут излучать больше, чем идеальный излучатель (АЧТ) при той же температуре. Например, солнце имеет такую же яркость, как и АЧТ с  $T=6000^\circ\text{C}$  и плотность энергии  $70$  Вт/мм<sup>2</sup>. Но эта энергия распределена в широком диапазоне длин волн. Луч лазера может иметь яркость, соответствующую температуре источника  $T=10^{19}$  °C.

Излучение лазера имеет высокую направленность. Обычные источники света излучают свет во все стороны. Плотность потока в луче такого источника убывает пропорционально квадрату расстояния от источника. На выходе лазера получают практически параллельный луч. Ширина расходящегося луча определяется отношением  $\theta = 1.22 l/d$ , где  $d$  - диаметр торца рабочего тела лазера.

Лазерный луч имеет высокую степень когерентности. Это излучение является пространственно когерентным, потому что все волновые фронты плоские и перпендикулярны направлению распространения волны. Это излучение когерентно и во времени, т.е. все волны имеют практически одну и ту же фазу. Чем выше степень когерентности излучения, тем до меньших размеров пятна оно может быть сфокусировано.

Благодаря рассмотренным свойствам излучения лазер можно сфокусировать на малую площадку и получить плотность энергии  $q_F = 10^4 \div 10^6$  Вт/мм<sup>2</sup>.

### 1.3.2 Сварочные установки с твердотельным лазером

Первые установки для сварки, термической резки и пробивки отверстий были созданы на твердотельных лазерах, в которых в качестве рабочего тела применен искусственный монокристалл рубина. Сейчас для сварочных установок широко используются лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом (Nd-АИГ-лазеры). В качестве примера рассмотрим принцип действия и устройство сварочной установки с лазером на рубине (рис. 9.1). Для лазеров используют искусственно выращенные монокристаллы бледнорозового рубина.

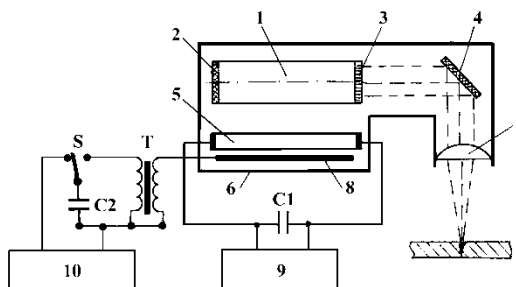


Рис. 9.1. Схема сварочной установки с твердотельным лазером:

1 - рабочее тело; 2, 3 - зеркала оптического резонатора; 4 - зеркало для поворота луча; 5 - лампа накачки; 6 - кожух эллиптического сечения; 7 - фокусирующее устройство; 8 - запускаяющий электрод; Т - импульсный трансформатор

Рубин состоит из окиси алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в котором часть атомов замещена атомами хрома. В бледнорозовом рубине хрома - 0.05%. Искусственно выращенные монокристаллы (були) имеют размеры: диаметр - до 30 мм, длина - до 1 м и более. Монокристалл тщательно обрабатывают, особенно торцевые поверхности, которые должны быть параллельны друг другу и перпендикулярны к оси стержня. На торцы стержня наносят специальное покрытие, чтобы получить высокий коэффициент отражения. Выходное зеркало имеет частичное отражение света и оно может пропускать свет, второе зеркало имеет полное

отражение света. Эти два зеркала образуют на рабочем теле оптический резонатор. В некоторых лазерах зеркала отделены от рабочего тела, они могут быть плоскими или сферическими.

Рабочее тело помещают в кожух с зеркальной внутренней поверхностью. В кожухе размещают мощную ксеноновую лампу, дающую мощную вспышку света при разряде конденсаторной батареи С1. Целесообразно применять кожух, который в сечении имеет форму эллипса. В этом случае рабочее тело и лампу устанавливают по осям, совпадающим с фокусом эллипса, чтобы все излучение лампы собиралось на рабочем теле.

Значительная часть излучения лампы тратится на нагрев рабочего тела. Поэтому в лазерных технологических установках предусмотрено охлаждение рабочего тела воздушным потоком, проточной водой, или даже жидким азотом для лазеров с высокой частотой излучения или непрерывным излучением.

Рассматриваемый лазер работает в импульсном режиме.

Для разряда С1 через лампу-вспышку необходимо вызвать первичную ионизацию газа в лампе. Для этого на запускающий электрод 8 лампы 5 с импульсного трансформатора Т подается импульс напряжения до 40 кВ, который образуется при разряде конденсатора С2 через первичную обмотку трансформатора.

Мощный световой импульс лампы переводит рубин в возбужденное состояние. В рубине активными центрами возбуждения являются атомы хрома. Лазер на рубине (как и большинство лазеров) работает по трехуровневой схеме (рис. 9.2).

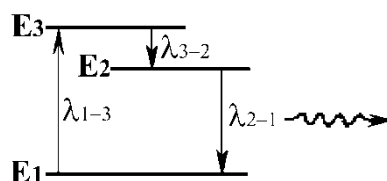


Рис. 9.2. Схема энергетических уровней атома хрома в кристалле рубина  
 $E_1$  - нижний (основной) уровень;  $E_2$  - промежуточный (метастабильный) уровень;  
 $E_3$  - верхний уровень возбужденного состояния

Известно, что при движении электрона по орбите вокруг ядра атом вещества энергии не излучает. При поглощении атомом кванта энергии  $E = \nu \cdot h$ , где  $\nu$  - частота,  $h$  - постоянная Планка, электрон переходит на новую орбиту, где энергия электрона увеличивается на величину  $E$ . При переходе с орбиты электрона с большей энергией  $E_n$  на орбиту, где энергия электрона  $E_m$  меньше, атом излучает квант энергии  $\nu \cdot h = E_n - E_m$ , с длиной волны  $\lambda = c/\nu$ , где  $c$  - скорость света.

Атом, находящийся в основном (невозбужденном) состоянии занимает нижний энергетический уровень с энергией, например,  $E_1$ . Атом, поглотивший квант энергии  $\nu \cdot h$ , переходит в нестабильное (возбужденное) состояние и занимает энергетический уровень с энергией, например,  $E_3 = E_1 + \nu \cdot h$  (верхний энергетический уровень).

Возврат атома на нижний уровень происходит самопроизвольно (спонтанно) или такой переход стимулируется. При этом такой переход может происходить через промежуточные энергетические уровни и подуровни, в этом случае излучаемые кванты энергии будут иметь различные частоты. В рубине возбужденные атомы хрома переходят на нижний уровень преимущественно через промежуточный уровень, т.е. лазер работает по трехуровневой схеме.

Из широкого спектра излучения лампы рубином поглощается излучение преимущественно с длиной волны  $\lambda=0.56$  мкм (зеленый участок спектра). Атомы хрома при этом переходят на энергетический уровень  $E_3$ . На этом уровне атомы хрома могут находиться очень короткое время ( $\tau_3=2 \cdot 10^{-7}$  с) и переходят на промежуточный уровень  $E_2$ . Излучаемые при этом кванты энергии с частотой  $\nu_{3-2} = (E_3 - E_2)/h$  находятся в инфракрасном участке спектра и расходуются на нагрев рубинового стержня.

Время жизни атомов хрома на уровне  $E_2$  значительно больше ( $\tau_2=5 \cdot 10^{-3}$  с). Это свойство приводит к тому, что большинство атомов хрома через некоторый интервал времени переходят на уровень с энергией  $E_2$ . Стержень рубина как бы накачан возбужденными атомами с энергией  $E_2$ . При отсутствии внешнего воздействия атомы хрома спонтанно переходят на нижний уровень  $E_1$ . При этом излучаются кванты энергии

(фотоны) с частотой  $\nu_{2-1} = (E_2 - E_1)/h$  (длина волны  $\lambda_{2-1} = \frac{c}{\nu_{2-1}} \approx 0.7$  мкм, красный

участок спектра).

При наличии оптического резонатора из двух зеркал происходит стимулированный лавинообразный переход атомов хрома в исходное состояние. Образовавшийся при спонтанном переходе фотон стимулирует переход на нижний уровень следующий атом хрома на длине рабочего тела, соизмеримой с длиной волны этого фотона ( $\lambda_{2-1} \approx 0.7$  мкм). Новый фотон имеет такие же направление, фазу, поляризацию, как и

возбуждающий фотон (т.е. получаем когерентное излучение) и такую же частоту  $\nu_{2-1}$  (т.е. монохромное излучение).

Лавинообразное размножение фотонов происходит только от светового потока, в котором фотоны направлены строго по оси оптического резонатора. Этот поток фотонов, многократно отражаясь от зеркал, лавинообразно нарастает и выходит через зеркало с частичным отражением практически в виде параллельного луча с ничтожно малым углом расхождения.

Потоки фотонов, имеющие другие направления, без существенного усиления излучаются рабочим телом через выходное зеркало или боковую поверхность. Излучение лазера прекращается, как только все атомы хрома перейдут на нижний уровень.

Для получения следующего импульса лазерного излучения необходимо зарядить конденсаторную батарею и инициировать зажигание лампы накачки.

Существенным недостатком твердотельных лазеров с оптической накачкой является низкий коэффициент полезного действия, его величина меньше 1%. Лазер требует интенсивного охлаждения. Частота импульсов излучения низкая (до 10 импульсов в минуту).

### 1.3.3 Сварочные установки с газовым лазером

Для сварочных установок применяются в основном лазеры на углекислом газе ( $\text{CO}_2$ -лазеры). В качестве активных частиц возбуждения, в углекислый газ добавляют гелий и азот.

Маломощные газовые лазеры выполняют в виде газоразрядных трубок с добавлением оптического резонатора из двух зеркал. Мощность газоразрядной трубки зависит от напряжения газового разряда, давления газа в трубке, длины трубки. Однако при повышении давления газа газовый разряд может перейти в дуговой, при повышении напряжения может возникнуть искровой или коронный разряд. При оптимальном для газового разряда напряжении и давлении газа с 1 метра газоразрядной трубки можно получить мощность примерно 50 Вт.

В то же время существует зависимость для концентрированных источников нагрева (электроннолучевая, плазменная, лазерная сварка): при сварке деталей толщиной 1 мм требуется мощность источника нагрева примерно 1 кВт.

Поэтому в мощных газовых лазерах с непрерывным излучением с целью существенного уменьшения размеров газоразрядной трубки или камеры требуется дополнительная накачка энергией рабочего газа с применением различных источников энергии (ТВЧ, потоков электронов, потоков ядерных частиц) и интенсивного охлаждения рабочего газа путем его прокачки через холодильник (в ряде случаев со сверхзвуковой скоростью).

В последние годы созданы газовые лазеры для сварки и термической резки с дополнительной накачкой энергией потоком электронов или высокочастотным электромагнитным полем и продольной или поперечной прокачкой рабочего газа для охлаждения, работающие в непрерывном или высокочастотном режиме лазерного излучения и имеющие мощность: 1, 2, 4, 10, 20, 40 и 100 кВт. Таким образом, максимальная толщина деталей при сварке или термической резке - 100 мм.

На рис. 9.3 показана одна из возможных схем сварочной установки с газовым лазером на  $\text{CO}_2$  с дополнительной накачкой энергией рабочего газа с помощью электронно-лучевой пушки.

Вакуумная полость электронно-лучевой пушки отделена от газоразрядной камеры тонкой мембраной 11, через которую поток электронов из пушки проникает в газоразрядную камеру. Ускоряющее напряжение пушки  $U \approx 200$  кВт.

В системе охлаждения установлен регенератор 8, для восстановления (регенерации) газовой среды в газоразрядной камере в связи с тем, что атомы азота соединяются с кислородом, который образуется вследствие частичной диссоциации  $\text{CO}_2$  при газовом разряде. Образование нитридов уменьшает в газовой среде число атомов азота, которые являются частицами возбуждения, поэтому без регенерации оптимального состава рабочего газа мощность газового лазера на  $\text{CO}_2$  быстро падает.

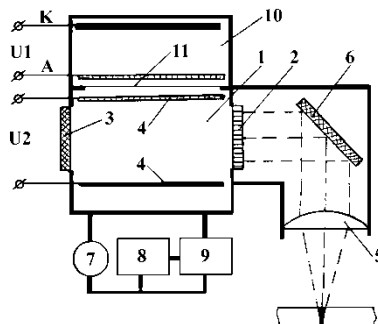


Рис 9.3. Схема сварочной установки с газовым лазером на  $\text{CO}_2$ :

1 - газоразрядная камера; 2, 3 - зеркала оптического резонатора; 4 - газоразрядные электроды; 5 - фокусирующее устройство; 6 - зеркало; 7 - насос; 8 - регенератор; 9 - холодильник газа; 10 - электронно-лучевая пушка; 11 - мембрана



### **1.3.4 Достоинства и недостатки лазерной сварки**

Высокая плотность энергии светового излучения лазера позволяет сваривать сварные швы с глубоким проплавлением и с малой зоной термического влияния (кинжальные швы). В отличие от электронно-лучевой сварки лазерной сваркой можно сваривать в открытой атмосфере, в струе защитного газа, в камерах контролируемой атмосферой, в вакуумных камерах. При сварке в камерах лазерная установка может размещаться вне камеры, в этом случае лазерный луч в зону сварки подается через прозрачное окно в стенке камеры.

Лазерной сваркой можно сваривать неэлектропроводные материалы, тугоплавкие металлы и неметаллы, самые тонкие детали, получать сварные швы микронной величины.

Высокая локальность нагрева позволяет сваривать лазерной сваркой материалы с различными теплофизическими характеристиками в труднодоступных местах, потому что этот вид сварки безконтактный.

К основным недостаткам лазерной сварки можно отнести следующее: высокая стоимость установок для сварки и резки лазерным лучом; низкий КПД большинства твердотельных лазеров (около 1%) и газовых лазеров (около 10%); зависимость эффективного КПД от отражающей способности нагреваемой поверхности и от длины волны лазерного излучения; низкая производительность сварки при применении твердотельных лазеров с импульсным излучением.

Для обслуживания и эксплуатации лазерных сварочных установок требуется высококвалифицированный обслуживающий персонал.

### **1.3.5 Область применения лазерной сварки и резки**

Основная область применения маломощных установок для сварки и резки лазерным лучом – электроника, производство интегральных и полупроводниковых элементов, приборостроение.

Для мощных лазеров с непрерывным или высокочастотным излучением принято считать, что при мощности лазерного излучения до 4...10 кВт эффективность применения лазерной сварки выше, чем электронно-лучевой сварки.

В самолетостроении нашла широкое применение лазерная резка для высокоточной размерной вырезки шаблонов на установках с программным управлением.