

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

**Технологические процессы лазерной обработки
металлов и сплавов**

Практическое пособие

для студентов специальностей
1–39 03 01 «Электронные системы безопасности»,
1–31 04 03 «Физическая электроника»

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2019

УДК 621.373.8:620.3:621.3.049.77(076)

ББК 34.500.88я73

Л175

Авторы:

В. Н. Мышковец, А. Н. Купо,
А. В. Максименко, Г. А. Баевич

Рецензенты:

кандидат технических наук А. А. Алексеенко;
кандидат технических наук Н. Н. Федосенко

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Л175 Лазерные технологии в микро- и наноэлектронике. Технологические процессы лазерной обработки металлов и сплавов : практическое пособие / В. Н. Мышковец [и др.] ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2019. – 37 с. ISBN 978-985-577-554-7

Практическое пособие «Лазерные технологии в микро- и наноэлектронике. Технологические процессы лазерной обработки металлов и сплавов» включает четыре лабораторные работы, тематика которых посвящена вопросам обработки металлов при воздействии лазерного излучения высокой интенсивности, обеспечивающей протекание таких процессов, как нагрев, плавление и испарение.

Предназначено для студентов факультета физики и информационных технологий специальностей 1–39 03 01 «Электронные системы безопасности» и 1–31 04 03 «Физическая электроника».

УДК 621.373.8:620.3:621.3.049.77(076)

ББК 34.500.88я73

ISBN 978-985-577-554-7

© Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Список условных обозначений.....	5
Лабораторная работа 1. Прошивка отверстий в материалах лазерным излучением.....	6
Лабораторная работа 2. Газолазерная резка металлических материалов.....	13
Лабораторная работа 3. Лазерная наплавка и легирование металлов.....	21
Лабораторная работа 4. Лазерная импульсная сварка металлов ...	30
Литература	37

ПРЕДИСЛОВИЕ

Работа в лаборатории – основной элемент подготовки будущего инженера в области прикладной электроники и радиофизики, поскольку учит самостоятельно воспроизводить и анализировать наблюдаемые физические явления, сопоставлять экспериментальные результаты и теоретические расчёты.

В соответствии с учебными планами специальностей 1–39 03 01 «Электронные системы безопасности» и 1–31 04 03 «Физическая электроника» в процессе изучения дисциплин «Лазерные технологии в микро- и наноэлектронике» и «Лазерные технологии обработки материалов электронной техники» предусмотрено выполнение лабораторных работ, описание и методика проведения которых представлены в данном издании.

В практическом пособии «Технологические процессы лазерной обработки металлов и сплавов» приведено описание четырёх работ. Описаны процессы и технологии обработки металлов, такие как прошивка отверстий, газоплазменная резка, наплавка, легирование и импульсная сварка металлов и их сплавов.

Выполнение каждой работы связано с необходимостью предварительного изучения соответствующего теоретического материала, который представлен в лекциях по данной дисциплине, а также в списке рекомендованной литературы.

Данное издание разработано авторами на основании многолетнего опыта проведения лабораторных работ по дисциплинам, связанным с технологиями лазерной обработки материалов.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АИГ – алюмоиттриевый гранат.
ЗЛВ – зона лазерного воздействия.
ЗТВ – зона термического влияния (воздействия).
ЛИ – лазерное излучение.
ПДУ (ЛИ) – предельно допустимый уровень (лазерного излучения).
 λ – длина волны ЛИ.
 α – видимый угловой размер источника излучения (рад).
 $\alpha_{\text{пред}}$ – предельный видимый угловой размер источника, при котором он может рассматриваться как точечный (рад).
 τ – длительность импульса лазерного излучения (с).
 D – оптическая плотность.
 D_{λ} – оптическая плотность светофильтра на длине волны λ .
 d – диаметр пучка ЛИ (м).
 D_a – диаметр ограничивающей апертуры (м).
 E – облученность ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$).
 $E_{\text{ПДУ}}$ – ПДУ облученности ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$).
 $E_{\text{ПДУ}}^c(t)$ – предельно допустимое значение облученности серии импульсов общей длительностью t .
 f – частота следования импульсов излучения (Гц).
 H – энергетическая экспозиция лазерного излучения ($\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$).
 $H_{\text{ПДУ}}$ – предельно допустимое значение энергетической экспозиции ЛИ.
 k – кратность (увеличение) оптического средства наблюдения.
 r – расстояние от источника излучения до точки наблюдения (м).
 P – мощность ЛИ (Вт).
 $P_{\text{ПДУ}}$ – предельно допустимый уровень мощности.
 S_a – площадь ограничивающей апертуры (м^2).
 S_p – площадь поперечного сечения пучка (м^2).
 S_o – площадь поверхности источника излучения (м^2).
 t – длительность воздействия (облучения) непрерывным излучением или серией импульсов лазерного излучения (с).
 T – температура (К).
 W – энергия ЛИ (Дж).
 $W(\tau)$ – энергия импульса ЛИ и длительностью τ .
 $W_{\text{ПДУ}}$ – предельно допустимый уровень энергии ЛИ.
 $W_{\text{ПДУ}}(\tau)$ – предельно допустимое значение энергии импульса ЛИ длительностью τ .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

ПРОШИВКА ОТВЕРСТИЙ В МАТЕРИАЛАХ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Цель работы: изучение процессов лазерной прошивки отверстий в материалах, проведение экспериментальных исследований прошивки отверстий в нержавеющей стали.

Оборудование: лазерная технологическая установка, инструментальный микроскоп, измеритель энергии ИКТ-1Н, осциллограф, образцы.

Теоретические сведения

Основными процессами, приводящими к образованию отверстий в материалах с использованием лазерного излучения, являются испарения и плавления вещества. По глубине отверстие растет за счет испарения, а по диаметру – за счет плавления стенок и вытеснения жидкости избыточным давлением паров.

При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью материала часть излучения поглощается и рассеивается продуктами разрушения. Наиболее существенное влияние на поглощение излучения в факеле оказывает паровая фаза продуктов разрушения, представляющая собой низкотемпературную слабоионизированную плазму, прозрачность которой определяется ее температурой и концентрацией. Экспериментально доказано, что поглощение излучения в плазме начинает иметь наиболее существенное значение при плотностях потоков излучения $q \geq 10^8 - 10^9$ Вт/см². Эта величина ограничивает сверху диапазон рабочих плотностей потоков излучения, используемых для получения отверстий в материалах.

Нижняя граница определяется плотностью потока, при которой процесс образования лунки начинается в момент окончания импульса, т.е. примерно соответствует порогу начала разрушения материалов (металлов) $q = 10^5 - 10^6$ Вт/см².

Выбор технологических режимов при прошивке отверстий лазерным лучом основывается на учете свойств обрабатываемого материала: коэффициент поглощения и отражательная способность при данной длине волны лазерного излучения, определяющие процесс поглощения энергии; удельная теплопроводность и температуропроводность, определяющие тепловой поток в материале;

плотность, удельная теплоемкость, скрытая теплота и температура фазового перехода, определяющие энергоемкость процесса перехода материала в новое фазовое состояние. При выборе режимов необходимо учитывать влияние энергетических и временных характеристик лазерного излучения. Многие технологические лазерные установки имеют одну неизменную продолжительность импульса. В таком случае получение заданных размеров отверстия достигается подбором нужного значения энергии импульса и зависимость глубины и диаметра полученного отверстия от энергии является одной из основных характеристик, определяющих возможности лазерной обработки. Величину энергии можно менять путем изменения электрической энергии импульсных ламп, применения светофильтров, диафрагмированием луча. При этом надо отметить, что когда энергия изменяется накачкой или диафрагмированием луча, диаметры полученных отверстий меньше, чем диаметры отверстий, получаемых при изменении энергии светофильтрами.

Уменьшение диаметра при диафрагмировании луча объясняется уменьшением его расходимости, а в случае изменения энергии – уровнем накачки активного элемента, уменьшением как расходимости луча, так и длительности излучения. Диафрагмирование луча при постоянной накачке активного элемента приводит к особенности: если диаметр отверстий связан с диаметром диафрагмы, то глубина отверстий меняется весьма слабо при изменении диафрагмы в широких пределах.

Неизменность глубины отверстия при диафрагмировании луча объясняется тем, что диафрагма не меняет распределения плотности потока в поперечном сечении луча, изменяя лишь общую расходимость и диаметр луча. Поскольку скорость роста лунки в глубину определяется плотностью мощности потока, то глубина отверстия не должна существенно изменяться при диафрагмировании луча.

Экспериментальные исследования показывают, что размеры отверстий зависят определенным образом и от длительности импульса лазерного излучения.

Изменение длительности импульса с 0,25 до 0,85 мс при неизменной энергии накачки приводит к увеличению глубины отверстия в 1,5 раза с одновременным уменьшением диаметра на 30 %. Зависимость глубины и диаметра получаемого отверстия от длительности импульса можно объяснить двумя факторами. Первый – распределение интенсивности излучения в поперечном сечении

луча – падает от своего максимального значения в центре луча к периферийным участкам его сечения. Вторым фактором – уменьшение экранирующего влияния продуктов разрушения материала при уменьшении плотности светового потока, когда длительность импульса увеличивается. Это объясняется увеличением доли жидкой фазы, которая остается на стенках отверстия и не может быть вытеснена из лунки из-за снижения давления паров и, таким образом, практически не участвует в экранировании излучения.

Важным фактором в образовании наплывов расплава по стенкам отверстия является наличие у импульса излучения пологого заднего фронта. Опыты, проведенные с отсечкой заднего фронта импульса, показывают, что при этом микрорельеф поверхности отверстия становится более ровным, практически без наплывов расплавленного металла, хотя глубина отверстия изменяется незначительно (15 % при отсечке заднего фронта длительностью 300 мкс).

Согласно феноменологической модели, строгий анализ роста лунки при плавлении стенок требует решения гидродинамической задачи при движении пара и вязкой жидкости вдоль стенок, с учетом всех факторов их нагрева. Будем рассматривать упрощенную модель, согласно которой при фокусировке излучения вблизи передней поверхности материала образуется лунка, профиль которой близок к цилиндрическому (рисунок 1.1). Изменение размеров лунки со временем происходит так, что в первом приближении текущий радиус $r(t)$ и глубина $h(t)$ связаны между собой уравнением светового конуса для крайних лучей пучка с углом раствора 2φ , т. е.

$$r(t) = r_0 + h(t) \operatorname{tg} \varphi \quad (1.1)$$

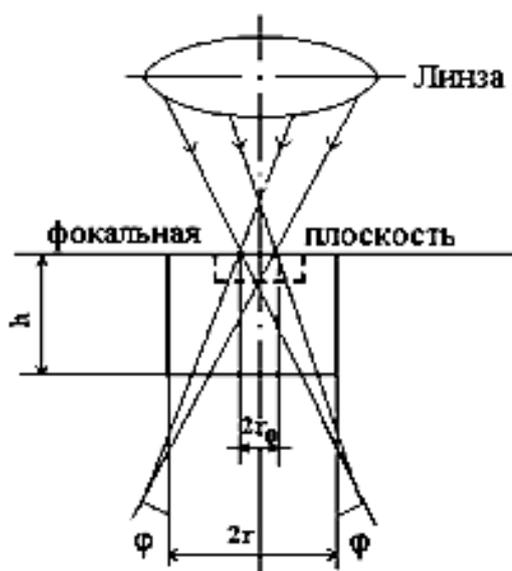


Рисунок 1.1 – Изменение глубины h и радиуса r лунки во времени

При построении феноменологической модели пренебрегается также температурная зависимость полной теплоты испарения материала и экранировка поверхности испарения продуктами разрушения.

Согласно феноменологической теории, если излучение лазера фокусируется на поверхность материала, то к моменту окончания действия импульса образуется отверстие глубиной

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r_0}{\operatorname{tg}\varphi}\right)^3 + \frac{3E}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2\varphi \cdot L_0}} - \frac{r_0}{\operatorname{tg}\varphi} \quad (1.2)$$

и диаметром

$$d = 2\sqrt{r_0^3 + \frac{3E \cdot \operatorname{tg}\varphi}{\pi \cdot L_0}}, \quad (1.3)$$

где $E = P \cdot \tau$ – энергия излучения в импульсе;

P – импульсная мощность;

r_0 – начальный радиус лунки, равный радиусу светового пятна;

φ – половинный угол раствора светового пятна;

L_0 – удельная скрытая теплота испарения вещества.

Таким образом, определяющим фактором, влияющим на соотношение глубины и диаметра отверстия, является величина $\operatorname{tg}\varphi$, характеризующая угол светового конуса, после фокальной плоскости оптической системы. Чем меньше $\operatorname{tg}\varphi$, тем больше отношение глубины к диаметру отверстия. Поэтому для получения глубоких узких отверстий оптимальным является случай, когда $\operatorname{tg}\varphi = 0$, при этом:

$$h = \frac{E}{\pi \cdot r_0 L_0}; d = 2r_0; \frac{h}{d} = \frac{E}{2\pi \cdot r_0 L_0}. \quad (1.4)$$

Соотношения (1.4) описывают процесс роста отверстия внутри цилиндрической световой трубки, в которую вырождается световой конус ($\operatorname{tg}\varphi = 0$).

Если $\operatorname{tg}\varphi \neq 0$, то расфокусировка лазерного пучка приводит к уменьшению плотности энергии в его нижней части.

Следствием этого является существование предельных размеров следствия, образующегося в материале под действием неограниченного числа световых импульсов с заданной энергией E :

$$D_{удел.} \approx 2\sqrt{\frac{E}{\pi \cdot Q}} ; H_{удел.} \approx \frac{\sqrt{\frac{E}{\pi \cdot Q} - r_0}}{\operatorname{tg} \varphi}, \quad (1.5)$$

где Q – пороговая плотность энергии, соответствующая установлению процесса квазистационарного испарения к концу импульса.

На профиль отверстия и на его размеры существенное влияние оказывают условия фокусирования лазерного излучения, под которым понимают фокусное расстояние фокусирующей системы и смещение фокальной ее плоскости относительно поверхности обрабатываемой детали. На рисунке 1.2 приведены профили отверстий, полученные в материале при одной и той же энергии излучения, но при различных положениях фокуса относительно поверхности обрабатываемой детали.

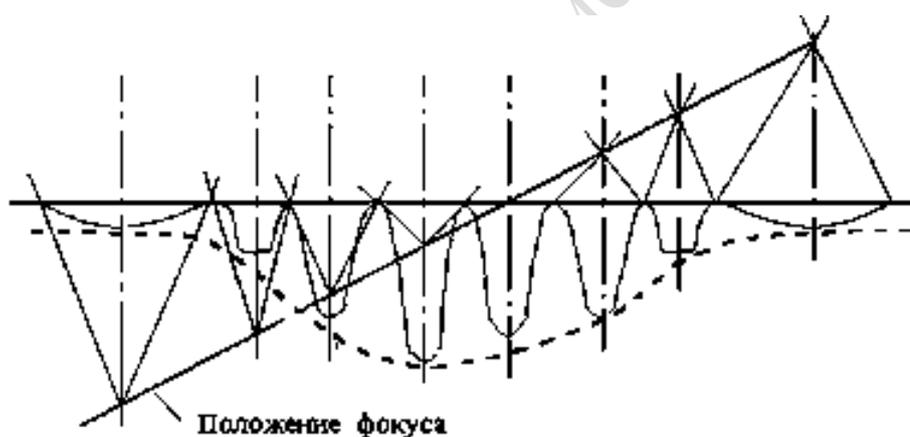


Рисунок 1.2 – Изменение профиля отверстия при различных положениях фокуса относительно поверхности материала

Из рисунка 1.2 видно, что в сходящемся лазерном пучке характерным является конический профиль отверстия, при этом стенки его практически не поглощают световой поток, распространяющийся вдоль них, и механизм разрушения представляет в этом случае испарение материала за счет теплопроводности. При облучении в расходящемся лазерном пучке достаточной плотности энергии, происходит интенсивное плавление стенок и, хотя общее количество удаляемого вещества при этом несколько возрастает за счет жидкой фазы, глубина отверстия

уменьшается из-за расфокусировки луча. Рассмотрим условия получения отверстий максимальной глубины за один импульс с заданной энергией и длительностью импульса лазерного пучка.

Из опытных наблюдений известно, что для получения отверстий максимальной глубины требуется сфокусировать световой пучок на расстоянии H от поверхности внутри материала.

Расчет величины l_0 производится в предположении, что до фокуса оптической системы отверстие повторяет форму и размеры светового конуса и механизмом его образования является испарение. В результате получим:

$$l_0 = \frac{r_0}{\beta} \left[\sqrt[3]{1 + \frac{3E\beta \cdot \operatorname{tg}\varphi}{\pi \cdot L_0 \cdot r_0^3 \beta + \operatorname{tg}\varphi}} - 1 \right], \quad (1.6)$$

$$H_{\text{Max}} = l_0 \frac{\beta + \operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi}, \quad (1.7)$$

где $\beta = \frac{D + 2\alpha \cdot l}{2f}$,

D – диаметр светового пучка на выходном зеркале лазера;

2α – угол расходимости излучения;

l – расстояние от лазера до переднего фокуса линзы с фокусным расстоянием F .

На практике очень важно по заданным размерам отверстия h и d рассчитать энергию E , длительность импульса τ , размер пятна сфокусированного лазерного излучения. Для решения этой задачи необходимо учитывать характер связи глубины с диаметром отверстия, согласно уравнению светового конуса $d = d_0 + 2h \operatorname{tg}\varphi$.

Для получения большей точности в определении диаметра можно воспользоваться простым соотношением между объемом удаленного из цилиндрического отверстия вещества и затраченной энергией излучения:

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} h L_p = E, \quad (1.8)$$

где L_p – удельная энергия разрушения единицы объема вещества, определяемая экспериментально.

Формулы (6.2)–(6.8) при известных оптических и теплофизических характеристиках материала могут быть использованы для расчета параметров светового импульса.

С помощью этих формул можно определить энергию и фокусное расстояние линзы, а остальные параметры импульса: длительность τ , угол расходимости излучения 2α и расстояние между лазером и передним фокусом линзы могут быть выбраны такими, какими обладает каждый конкретный лазер. Поэтому величины τ , α и l будем считать известными. Тогда величины E и F могут быть определены так:

$$E = \pi L_p R^2 H \quad (1.9)$$

$$F = \left\{ \frac{3 r^2 \varepsilon - \alpha \cdot h \cdot S + \left[9 r^2 \varepsilon - \alpha \cdot h \cdot S^2 - 12 \alpha^2 \cdot S^2 h^2 \right]^{1/2}}{6 \alpha^2} \right\}^{1/2}, \quad (1.10)$$

где $R = \frac{d}{2}$; $S = \frac{D - 2\alpha \cdot l}{2}$; $\varepsilon = \frac{L_p}{L_0}$

Экспериментальные исследования по прошивке отверстий в данной работе проводятся на лазерной технологической установке, описанной в лабораторной работе 3.

Порядок выполнения работы

1. По формулам (1.9) и (1.10) рассчитать величину энергии излучения лазера E и величину фокусного расстояния объектива F для прошивки отверстий в нержавеющей стали $H = 1$ мм и диаметром $d = 0,3$ мм ($D = 6,3$ мм, $l = 500$ мм, $2\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ рад, $\tau = 1,5$ мс).

2. Провести исследование зависимости формы продольного сечения отверстий от положения фокуса лазерного пучка относительно поверхности обрабатываемой детали.

3. Экспериментально исследовать зависимость размеров получаемых отверстий при различных значениях энергии излучения лазера.

4. Составить отчет о проделанной работе.

Вопросы для самоконтроля

1. В чём проявляется влияние свойств материала на выбор технологических режимов при прошивке отверстий лазерным излучением?

2. Как проявляется зависимость размеров получаемых отверстий от энергетических и временных характеристик лазерного излучения?

3. В чём проявляется зависимость формы отверстий при одной и той же энергии, но при различных положениях фокуса объектива относительно поверхности образца?

4. Приведите методику расчета параметров лазерного импульса с целью получения цилиндрического отверстия с размерами H и d при известных оптических и теплофизических характеристиках материала.

5. Опишите оптическую схему лазерной установки.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

ГАЗОЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: приобретение представлений о процессе газолазерной резки металлов и навыков разделения металлов методом газолазерной резки.

Оборудование: импульсный лазер на алюмо-иттриевом гранате, оптическая формирующая система, координатный стол с ПК, инструментальный микроскоп, измеритель мощности лазерного излучения.

Теоретические сведения

К наиболее перспективным процессам разделения материалов следует отнести газолазерную резку металлов, основанную на процессах нагрева, плавления, испарения, химических реакциях горения – удаления расплава из зоны реза. При газолазерной резке в зону обработки совместно с лазерным лучом подается струя газа, способствующая удалению продуктов разрушения и инициирующая химическую реакцию в месте воздействия излучения на материал. Для этого используется кислород, сжатый воздух, инертный или нейтральный газы.

При газолазерной резке в зависимости от свойств обрабатываемого материала и химического состава газа, подаваемого в зону обработки, различают два механизма: химический и физический.

Химический механизм характеризуется существенным вкладом энергии реакции горения в общий тепловой баланс и наблюдается в основном при лазерной резке в струе кислорода, металлов, образующих жидкотекучие окислы. При реализации химического механизма резки возможны два режима: управляемой резки, когда тепло реакции горения только лишь дополняет эффект воздействия лазерного излучения и неуправляемой (автогенной) резки, когда металл горит за счет тепла реакции горения по всему диаметру струи, а лазерная энергия служит лишь для инициирования этой реакции. Физический механизм заключается в плавлении металла лазерным излучением и удалении расплава из зоны резки струей газа. Такой механизм наблюдается обычно при обработке металлов с малым тепловым эффектом реакции горения или металлов, образующих при горении тугоплавкие окислы, а также при использовании инертных газов.

При газолазерной резке металлов в струе кислорода последний способствует росту окисной пленки на поверхности металла и в результате снижения его отражательной способности.

Выделяющееся в результате экзотермической реакции горения металла в кислороде тепло идет совместно с лазерным излучением на разрушение металла в зоне обработки. Струя уносит продукты разрушения, обеспечивая приток кислорода непосредственно к фронту горения, а также препятствует чрезмерному нагреванию материала детали. Для невоспламеняющихся материалов газовая струя выполняет в основном функции по очистке зоны резания, а также функцию защиты поверхности оптической системы от попадания на нее продуктов выброса из зоны реза. Необходимо отметить, что для металлических материалов коэффициент отражения излучения оказывается достаточно большим. Обработка металлов в окислительной среде способствует резкому повышению коэффициента поглощения.

Во многом определяют протекание газолазерной резки металлов условия фокусировки лазерного излучения. При резке углеродистых сталей, титановых сплавов и цветных металлов лучшие результаты (повышение глубины реза и снижение его ширины) получены при фокусировке лазерного излучения в пятна меньшего диаметра, с целью повышения плотности мощности в зоне обработки. Для этого следует применять лазерные установки с возможно меньшим диаметром выходящего из резонатора лазерного пучка, работающие в одномодовом режиме, а также более короткофокусные линзы для фокусирования лазерного излучения.

Наиболее существенными факторами, влияющими на процесс

газлазерной резки металлов, являются мощность лазерного излучения, скорость резки, давление поддуваемого газа.

Основными характеристиками газлазерной резки являются ширина и глубина реза, качество формируемых кромок, ширина зоны термического влияния (ЗТВ). В общем случае на процесс резки также влияют технологические условия реализации процесса.

В большинстве случаев при газлазерной резе локальный нагрев осуществляется за время более 10^{-8} с, что позволяет использовать для описания тепловых процессов классическую теорию теплопроводности. В зависимости от параметров теплового источника (мощности или энергии излучения, диаметра пятна фокусировки, длительности воздействия) используют различные модели нагрева. Для оценки параметров раскроя и выявления их функциональной взаимосвязи можно воспользоваться простой моделью полного теплового баланса.

Если принять, что вся энергия излучения расходуется на плавление и испарение материала, то можно записать

$$AP = vbh\rho(c\Delta T + L_m \cdot m + mL_{ev}), \quad (2.1)$$

где P – падающая на поверхность мощность излучения;

A – поглощательная способность поверхности;

v – скорость перемещения лазерного луча;

b – ширина реза;

h – глубина прорезания;

ρ – плотность материала;

c – теплоемкость;

L_m – скрытая теплота плавления;

L_{ev} – скрытая теплота испарения;

m – масса испаренного вещества.

Из формулы (2.1) в приближении быстро движущегося теплового источника ($vr/a \gg 1$, где $d = 2r$ – диаметр пятна фокусировки, a – коэффициент температуропроводности, легко рассчитать зависимость $h(P)$). В предположении, что вся энергия лазерного излучения затрачивается на нагрев удаляемого материала до температуры испарения и передачу ему скрытой теплоты испарения, максимальную глубину слоя испаряемого материала можно определить как

$$h = \frac{2AP}{\pi r_f \rho v (cT_{ev} + L_{ev})}, \quad (2.2)$$

где радиус r_f определяется коэффициентом сосредоточенности поверхностного теплового источника.

Линейная зависимость $h \sim P$ справедлива при небольших толщинах разрезаемого материала, равных нескольким r_f . При больших толщинах материала $h \sim P^{1/2}$.

Ширину ЗТВ можно оценить из простого соотношения для температуры нагрева, обусловленного действием нормально-полосового источника, интенсивность которого в радиальном направлении распределена по закону Гаусса, а по толщине пластины равномерно. В этом случае

$$T_y = \frac{AP}{vhcpr_f \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{r_f^2}\right). \quad (2.3)$$

Следует отметить, что для материалов отражение излучения стенками и волноводный характер распространения луча внутри канала реза не имеет столь существенного значения.

В настоящее время в ходе теоретических и экспериментальных исследований выработаны рекомендации по выбору оптимальных режимов резки углеродистых сталей больших толщин. Это позволяет повысить скорость резки. Учитывая, что с повышением мощности лазерных установок их стоимость резко возрастает, не всегда экономически целесообразно применять более мощное оборудование при резке этих сталей. При резке нержавеющей сталей больших толщин, для получения качественных резов предпочтительно применять линзы с большим фокусным расстоянием ($F \sim 200$ мм). При использовании же более короткофокусных линз ($F \sim 100$ мм) необходимо проводить резку при пониженных значениях мощности лазерного излучения ($P \sim 0,5$ кВт). Существенным фактором, влияющим на характеристики резов, являются энергетические параметры процессов, к которым относятся мощность и плотность мощности лазерного излучения. Удобной величиной, характеризующей эффективность и качество процесса, оказывается комплексный параметр, представляющий собой отношение мощности излучения к скорости резки (P/V_p) или (P/h) (где h – глубина прорезания металла). Если потери на теплопроводность значительно меньше потерь на нагрев и плавление материала, можно записать выражение для баланса энергии:

$$h \cdot V_p \cdot b \cdot C \cdot \rho \cdot T_{nl} + L_{nl} = \eta \cdot P, \quad (2.4)$$

где P – суммарная мощность лазерного излучения и экзотермической реакции окисления;

$\eta = \eta_3 \cdot \eta_T$ – эффективность процесса (η_3 – эффективный КПД;
 η_T – термический КПД);

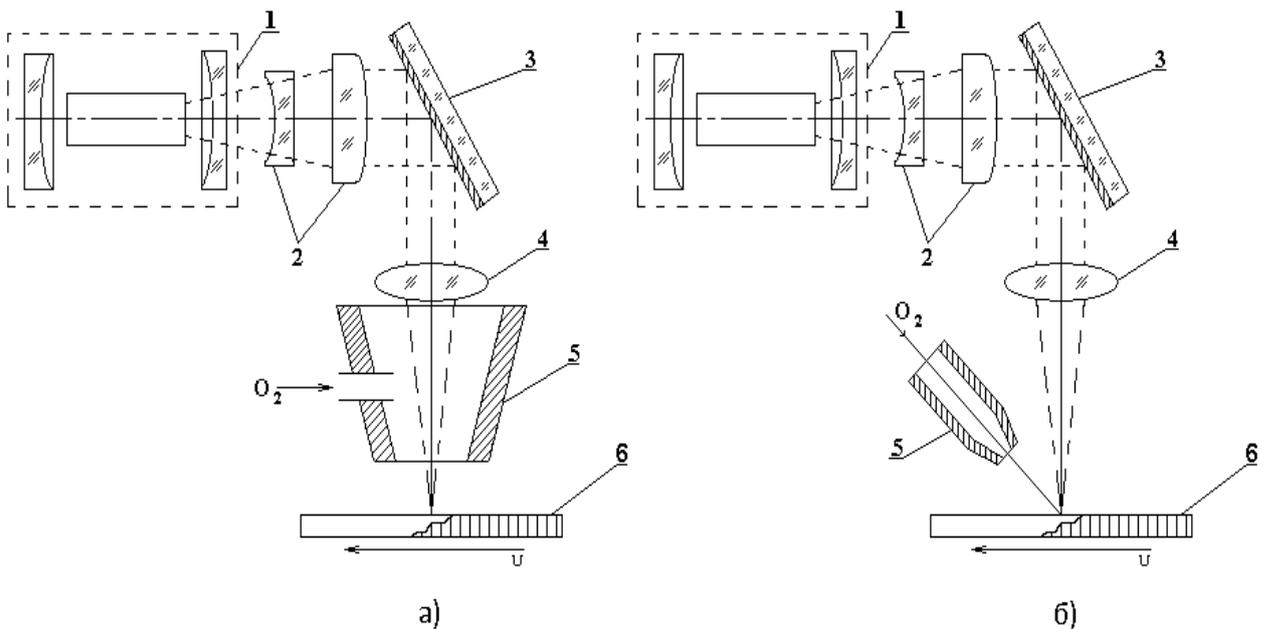
$L_{пл}$ – удельная энергия плавления металла.

Так как при лазерной резке ширина реза равна диаметру лазерного луча, то из последнего выражения следует, что $V_p \sim P$ при $h = \text{Const}$.

Зависимость скорости резки от толщины пластины менее определена, поскольку допустимая скорость может также ограничиваться качеством резки. Однако в общем случае $V_p \sim H^1$.

С ростом скорости параметр P/h , характеризующий затраты мощности на единицу глубины реза, возрастает.

Плотность мощности E_f в зоне воздействия лазерного излучения на материал является также комплексной величиной и зависит не только от мощности, но и от условий его фокусирования, модового состава луча, его расходимости, диаметра пучка на выходе из резонатора. Поэтому при выполнении работ по газолазерной резке материалов применяются две схемы подачи газа в зону реза: соосно с лучом лазера через сопло газолазерного резака (представлена на рисунке 2.1,а); сбоку под углом к оптической оси луча через специальный капилляр (форсунку) (представлена на рисунке 2.1,б).



1 – лазер; 2 – телескопическая система; 3 – зеркало;
 4 – объектив; 5 – сопло; 6 – деталь; 7 – форсунка

Рисунок 2.1 – Схемы газолазерной резки материалов

Подготовка управляющих программ для лазерной резки

Подготовку управляющих программ для лазерной резки проводят с помощью систем автоматизированного проектирования как стандартных (AutoCAD), так и поставляемых разработчиками в комплекте с лазерным оборудованием. Качество лазерной резки закладывается на стадии проработки чертежей и подготовки программ раскроя.

Лазерная резка, как правило, начинается с прошивки начального отверстия. При формировании кратера диаметр отверстия, особенно для непрерывного режима генерации лазерного излучения, оказывается большим, чем ширина реза. Поэтому начальное отверстие рекомендуют располагать вне контура. На этапе формирования начального отверстия в материале при использовании лазерных установок непрерывного режима генерации излучения необходима пауза, т. е. задержка на врезку. Расстояние от начального отверстия до точки входа в контур называют длиной врезки. Для обеспечения качественной резки, как по наружному, так и по внутреннему контуру, целесообразно располагать врезку на линии, находящейся на продолжении одной из прямых линий контура или по касательной к окружности. При вырезании мелких элементов следят за тем, чтобы вносимая при формировании начального отверстия энергия рассеивалась до начала резки по основному контуру. Избегают выполнения прошивки в узких местах, в острых углах и т. д.

Для повышения качества обрабатываемых деталей при лазерной резке нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов участки изменения скоростей движения режущей головки выносят за пределы контура, чтобы исключить формирование грата. Расстояние от контура до точки завершения резки называют длиной выхода. Оптимальной считают длину врезки, равную удвоенной толщине заготовки, а длина выхода должна соответствовать толщине обрабатываемого материала. Для обеспечения чистой поверхности реза диаметр вырезаемого отверстия должен составлять не менее 1,2–1,5 толщины заготовки. Если диаметр вырезаемого отверстия менее 30 мм, то его врезку рекомендуют проводить от центра.

Для обеспечения более динамичной работы привода, уменьшения зоны термического влияния и устранения грата целесообразно закруглять вершины узлов вырезаемого контура, как представлено на рисунке 2.2.

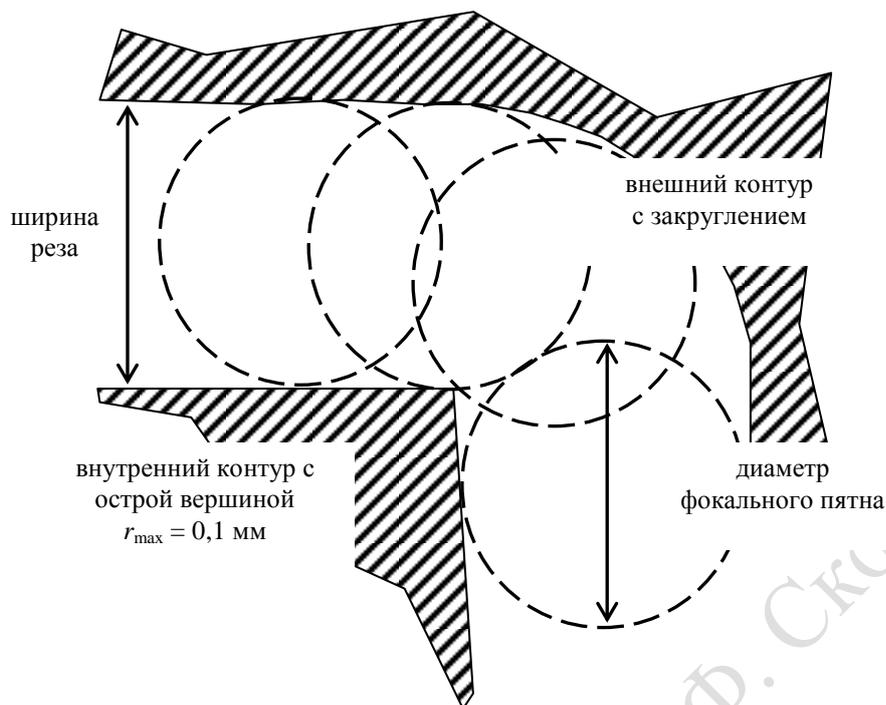


Рисунок 2.2 – Закругление вершин углов вырезаемого контура

Оптимальный радиус закругления равен одной десятой толщины заготовки. Радиус закругления вершины острого угла внутреннего элемента выбирают равным половине ширины реза, на готовом изделии закругление угла отсутствует.

При вырезке на высокой скорости остроугольных элементов из тонколистовых материалов для обеспечения постоянной скорости резки рекомендуют выполнять так называемые петли, что приводит к уменьшению размеров зоны термического влияния и снижению вибрации элементов технологической системы, являющихся причиной образования грата. Этот метод, схема которого представлена на рисунке 2.3, используют для предотвращения перегрева и выгорания металла на угловых элементах заготовок любой толщины.

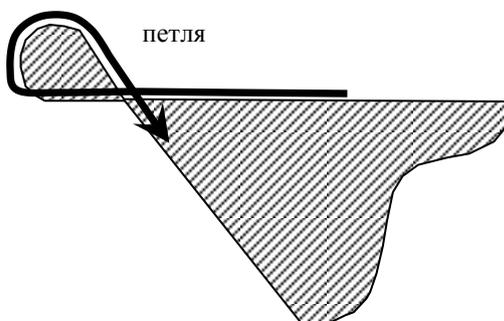


Рисунок 2.3 – Вырезка на высокой скорости остроугольных элементов из тонколистовых материалов

При окончании вырезки фрагмента детали по замкнутому контуру его отделение происходит несколько раньше момента возвращения луча в начальную позицию. При приближении лазерного луча на расстояние d к начальной позиции (рисунок 2.4) сохраняющаяся перемычка изгибается, деталь наклоняется вниз. Излучение, переотражаясь от кромок реза, подплавляет их. Для предотвращения подплавления кромок реза контур резки целесообразно оставлять незамкнутым с зазором, равным d .

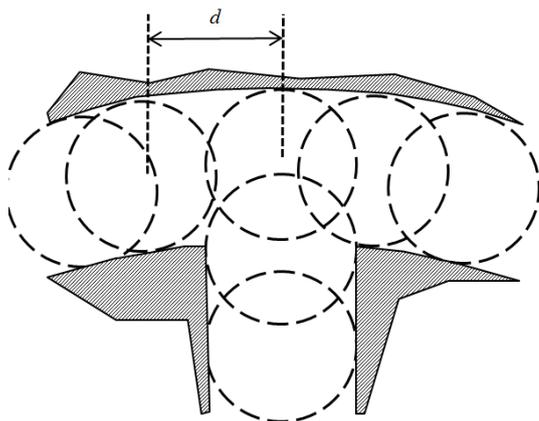


Рисунок 2.4 – Вырезка фрагмента детали по замкнутому контуру

Осуществляют прекращение подачи излучения в момент, когда контур резки еще не замкнут и вырезанный фрагмент остается связанным с заготовкой перемычкой шириной b (рисунок 2.5). Вырезанный элемент удаляют вручную. Ширина b должна быть больше или равной d , т. е. ширине реза.

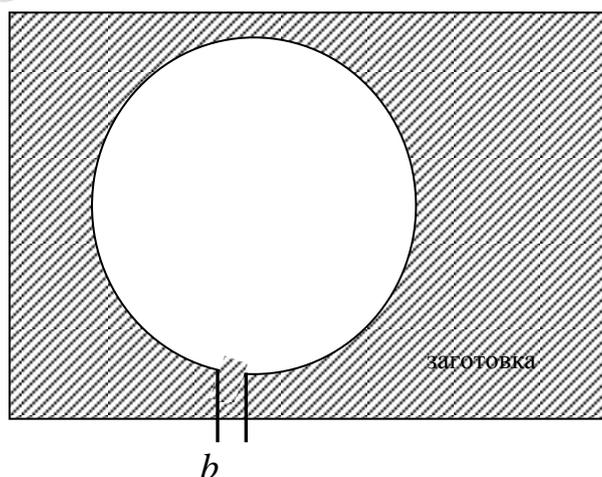


Рисунок 2.5 – Вырезанный элемент с перемычкой шириной b

Порядок выполнения работы

1. Включить лазерную установку согласно техническому описанию.
2. Провести юстировку оптической формирующей системы по схеме на рисунке 2.1 а).
3. Установить оптимальный расход подачи технологической среды в зону резки.
4. Провести исследования зависимости глубины реза от скорости перемещения образца относительно лазерного луча при различных значениях фокусного расстояния объектива: $F_1 = 50$ мм, $F_2 = 100$ мм, $F_3 = 200$ мм и толщины материала $h_1 = 0,5$ мм, $h_2 = 1,0$ мм, $h_3 = 1,5$ мм, $h_4 = 2,0$ мм. Построить график зависимости $h = F(v)$.
5. Исследовать влияние степени расфокусировки на ширину реза для материалов толщиной $h_1 = 0,5$ мм, $h_3 = 1,5$ мм. Построить график зависимости величины b от ΔF .
6. Определить зависимость ширины реза от мощности излучения лазера.
7. Составить отчет о проделанной работе.

Вопросы для самоконтроля

1. В чём суть метода газолазерной резки материалов?
2. Опишите типы лазеров применяемых в газолазерной резке.
3. Опишите физико-химические механизмы газолазерной резки.
4. Каковы основные факторы, влияющие на процесс газолазерной резки материалов?
5. Какие оптимальные технологические режимы используются для процесса газолазерной резки металлов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА И ЛЕГИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ

Цель работы: приобретение представлений о процессах импульсной лазерной наплавки и легирования металлов и навыков

проведения наплавки и легирования с использованием присадочных материалов.

Оборудование: лазерная технологическая установка, металлографический микроскоп, измеритель энергии ИКТ-1Н, осциллограф, присадочные материалы, образцы нержавеющей стали и конструкционных среднелегированных сталей.

Теоретические сведения

Процесс лазерной наплавки заключается в нанесении на поверхность материала покрытия путем расплавления основы и присадки. Причем основа подправляется минимально, поэтому свойства покрытия зависят главным образом от свойств присадочного материала.

Главная цель наплавки – получение покрытий при изготовлении деталей машин и ремонт изношенных в процессе эксплуатации деталей.

В промышленности существует достаточно много методов наплавки, однако им присущи следующие недостатки:

- 1) низкая производительность, например, при дуговых методах;
- 2) недостаточная адгезионная прочность;
- 3) значительное перемешивание основы с наплавляемым металлом;
- 4) существенное тепловое воздействие и связанные с ним деформации деталей.

Применение лазерной наплавки во многих случаях позволяет решить комплекс указанных проблем.

Основные преимущества лазерной наплавки:

1) высокая производительность (70–120 м/ч) обеспечивается введением достаточного для осуществления процесса количества энергии за крайне малые промежутки времени;

2) локальность процесса нагрева в диапазоне 0,5–5,0 мм, позволяющая осуществлять наплавку как на узких участках, так и на больших поверхностях. (В последнем случае применяют многоваликовый метод с перекрытием);

3) высокая прочность сцепления покрытия с основным металлом, обеспечиваемая наличием энергии излучения, достаточной для одновременного расплавления и покрытия, и основы, независимо от их химического состава;

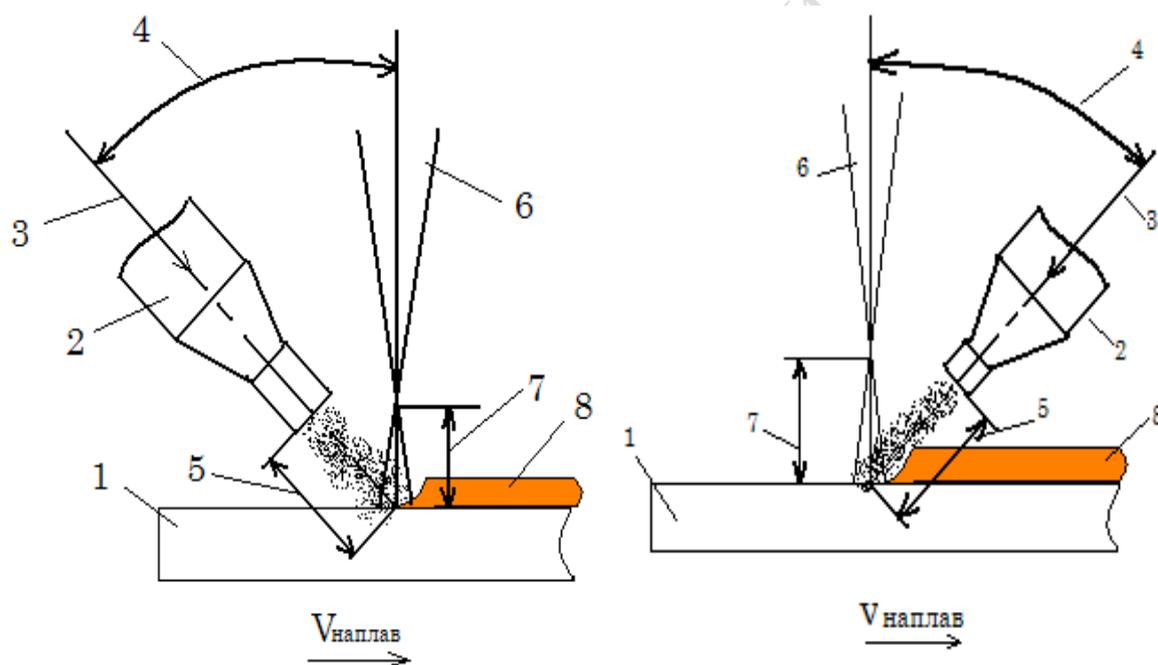
4) точная дозировка и высокая концентрация энергии излучения, обеспечивающие минимальное подплавление материала основы

и снижающие долю попадания его в наплавленный слой (одно из не-
пременных требований для обеспечения высоких свойств наплавки);

5) минимум деформации деталей в процессе наплавки.

Качество покрытия зависит от присадочных материалов и по-
рошков, наносимых предварительно на поверхность основы. Наиболее технологично использование пасты, приготовленной из порошков с неметаллическими связующими. Паста не только является средством удержания порошка, но и выполняет роль поглощающего покрытия.

Другой способ наплавки заключается в использовании присадочного порошка, подаваемого вибропитателем или с помощью продува инертных газов (азот, гелий, аргон, CO_2) в зону обработки одновременно с воздействием лазерного излучения, когда частицы порошка достигают поверхности уже нагретыми до температуры плавления (рисунок 3.1).



1 – деталь; 2 – сопло для подачи порошка; 3 – направление подачи порошка;
4 – угол подачи порошка; 5 – дистанция подачи порошка; 6 – лазерный луч;
7 – величина расфокусировки; 8 – наплавленный валик

Рисунок 3.1 – Схема лазерной наплавки с принудительной подачей порошка вслед (а) и навстречу движению (б) обрабатываемой детали

При этом формируется валик путем постепенного наращивания слоя от основания к поверхности. Этот способ характеризуется минимальным тепловым воздействием на материал основы.

Одним из способов лазерной наплавки является наплавка с использованием компактного присадочного материала в виде проволоки.

Применяют и лазерный переплавление плазменных покрытий. Они отличаются низкой адгезионной прочностью и пористостью, являясь удобной формой подготовки для лазерного переплавления. При оплавлении таких покрытий достаточно просто получают качественные широкие полосы с перекрытиями. Наплавленный металл и металл плазменного покрытия после лазерной обработки характеризуются мелкодисперсной, многофазной структурой с равномерным распределением по объему упрочняющих фаз. Поверхностный слой имеет плотное сварное соединение с металлом основы.

Для рассмотренных методов наплавки используют лазеры непрерывного и импульсного действия, а также маломощные твердотельные и мощные газовые лазеры. Маломощные лазеры применяют в случае прецизионной наплавки, когда производительность не является основным фактором и толщина наплавленного слоя незначительна. Когда же скорость обработки достигает 100–150 м/ч, а толщина покрытий нескольких миллиметров, необходимы лазеры мощностью в нескольких киловатт.

Основными параметрами, учитываемыми при оценке качества лазерной наплавки, являются геометрические размеры наплавки, прочность соединения, наличие внутренних и внешних дефектов, химический состав, структура металлов наплавки и основы. В каждом конкретном случае при наплавке металлов необходимо решать ряд проблем: выбирать способ и условия наплавки; термический режим для её выполнения; определять материал, пригодный для обеспечения соответствующих свойств наплавки; оценивать возможность наплавки этого материала на основной металл.

В процессе импульсной лазерной наплавки с применением присадочного материала происходит нагрев основного и присадочного металлов до температур, превышающих температуры их плавления, и образуется зона расплава в местах наплавки.

При выборе термического режима для выполнения наплавки, необходимо учитывать то обстоятельство, что в ходе обработки происходит испарение металла с поверхности, и в результате импульса отдачи паров – резкий прогиб поверхности расплава с

последующим вытеснением (выплеском) металла из зоны воздействия. Это препятствует получению плотных покрытий без пор и обеспечению их геометрических размеров.

Поэтому для каждого металла и различных типов присадочного материала существуют оптимальная форма и диапазон длительностей импульсов, в пределах которых наплавка получается с минимальным количеством испарения поверхности.

Кроме длительности и формы импульса излучения, на процессы нагрева металлов с формированием бездефектной и однородной наплавки значительное влияние оказывает энергия импульса лазерного излучения.

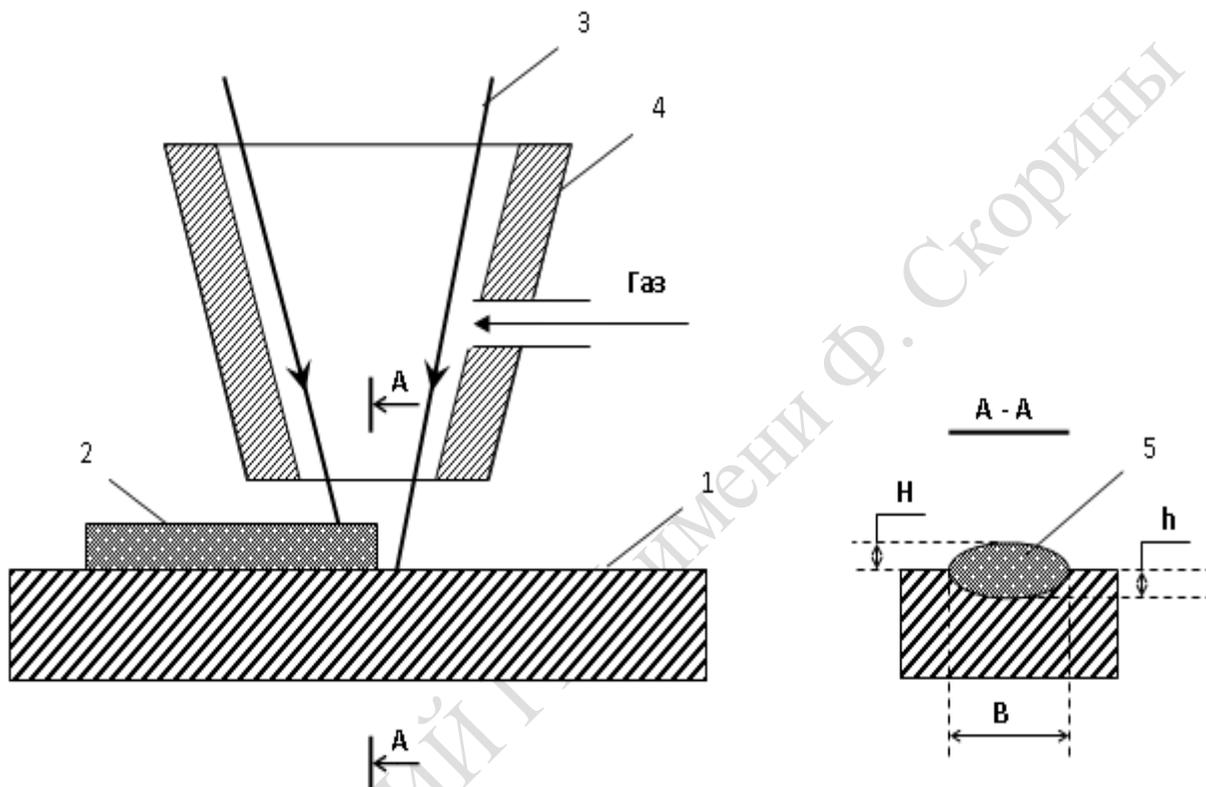
При импульсной наплавке величина энергии должна соответствовать той, при которой за время импульса на поверхности металла достигается температура плавления $T_{пл}$. При последующем подводе энергии лазерного излучения происходит продвижение изотермы плавления в глубину материала и рост температуры его поверхности, от которой зависит глубина плавления, а также степень загрязнения свариваемых деталей продуктами испарения материала, так как интенсивность испарения расплава увеличивается с ростом его температуры. При этом значение энергии не должно превышать того, при котором наблюдается интенсивное испарение с поверхности расплава. Допустимую температуру нагрева металлов, при которой лазерная наплавка происходит еще без существенного загрязнения продуктами испарения материала, обычно связывают с его температурой кипения $T_{к}$. При достижении температуры кипения в приповерхностном слое начинаются интенсивное парообразование, движение и выплеск расплава, что обусловлено наличием газовых раковин, пор, неметаллических включений и других дефектов материала, выполняющих функции зародышей парообразования и кипения.

Поэтому при выборе оптимальных значений энергии лазерного излучения при реализации наплавки руководствуются тем, что величина энергии не должна превышать такую, при которой наблюдается интенсивное кипение расплавленного металла в зоне лазерного воздействия.

Импульсная лазерная наплавка на основной металл компактного присадочного материала в виде проволоки выполняется посредством одиночных наплавов (при воздействии одного лазерного импульса), а также посредством однослойных и многослойных наплавов.

Расположение металла основы и присадочного материала относительно лазерного пучка и форсунки для подачи газа (аргона) в

зону обработки, а также форма и геометрические размеры наплавки на поверхности основы схематически изображены на рисунке 3.2. Формирование валика проводится в результате наплавки последовательно расположенных отдельных перекрывающихся между собой локальных наплавочных ванн (с коэффициентом перекрытия 0,5–0,7), ширина которых соответствует диаметру лазерного пучка на поверхности обрабатываемой детали.



1 – металл основы; 2 – присадочный материал; 3 – лазерный пучок;
4 – форсунка для подачи газовой среды; 5 – форма наплавленного металла

Рисунок 3.2 – Расположение металла основы и компактного присадочного материала в виде проволоки относительно лазерного пучка

Нанесение однослойных и многослойных покрытий выполняется таким образом, чтобы каждый последующий валик расплавлял предыдущий на $1/2$ – $1/3$ часть его ширины.

Перед проведением наплавки поверхности присадочных материалов и основы подвергаются обработке, которая заключается в удалении абразивными кругами или металлическими щетками защитных покрытий, коррозионных повреждений, оставшихся загрязнений и оксидов. На заключительном этапе подготовки в целях устранения абразива, пыли и влаги поверхность металлов обезжиривается и подвергается воздействию струи сжатого воздуха.

Эффективность процесса наплавки, а также степень дефектности и однородности структуры наплавляемого металла во многом зависят от размерных параметров наплавки, которые определяются плотностью мощности лазерного излучения. Такими параметрами при импульсной лазерной наплавке являются глубина плавления основы и коэффициент формы валика наплавки:

$$K = B/H,$$

где B – ширина валика наплавки;

H – высота валика наплавки.

При реализации высокоэффективных технологических процессов наплавки компактных присадочных материалов значения коэффициента формы валика наплавки должны быть в пределах от 0,4 до 0,9. Глубина плавления основы h , не должна быть меньше 0,5 радиуса присадочного материала в виде проволоки.

Легирование, так же, как и закалка, необходимо для улучшения механических и коррозионных свойств поверхностного слоя материала. Сущность легирования заключается в одновременном расплавлении присадочного материала и основного при их интенсивном перемешивании для получения поверхностного слоя нового качества. Принципиальное отличие этого процесса от наплавки состоит в том, что в первом случае свойства поверхности определяются свойствами сплава основного металла с присадкой, а во втором – свойствами присадки.

Легирующие вещества обычно располагают на поверхности детали до начала процесса обработки. Наносят их различными способами: электролитическим методом, напылением, нанесением покрытий в виде пасты из металлического порошка и различных связующих веществ. В некоторых случаях легирующий металл насыпают в виде порошка либо накатывают в виде фольги на поверхность образца.

Легирование лазерным воздействием возможно из различных сред-газов и жидкостей. При легировании из газовых сред процесс необходимо вести в специальных камерах при высоком давлении газовой среды (до 0,1 МПа).

Процессы лазерного легирования различают по составу вводимых компонентов: металлических, неметаллических, а также из твердых сплавов. В качестве легирующих обмазок может быть использован раствор графита в ацетоне или спирте (цементация) в виде паст на основе аммиачной соли (азотирование), на основе порошка кремния (силицирование), в виде обмазок, содержащих

порошок бора (борирование). В некоторых случаях удается повысить поверхностную микротвердость металлов до 17 000–21 000 МПа. Алюминиевые сплавы после легирования повышают микротвердость до 10 000 Мпа.

Легирование можно проводить и металлами. Например, чугуны и стали легируют хромом и никелем, титановые сплавы – железом, никелем, хромом.

Преимущества и недостатки этого метода и метода лазерной наплавки с оплавлением покрытий во многом сходны.

Одной из разновидностей лазерной обработки является аморфизация поверхности, т. е. получение слоя металла с хаотичным расположением атомов относительно друг друга. В литературе этот процесс еще называют остеклованием поверхности.

Физическая природа процесса аморфизации заключается в следующем. При медленном охлаждении расплавленный металл затвердевает в точке плавления с образованием кристаллической решетки атомов. Эта фаза стабильна, так как соответствует наиболее плотной упаковке атомов; свободная энергия системы достигает минимума. Если охлаждать жидкость достаточно быстро, так, чтобы атомы не успевали перегруппироваться, то в затвердевшем расплаве атомы будут расположены беспорядочно. Этот процесс может протекать при очень высоких скоростях охлаждения (порядка 10^5 – 10^6 °C/с). Лазерное излучение позволяет создавать подобные скорости охлаждения в слоях поверхности материала толщиной в несколько десятков микрон.

Аморфизация поверхности повышает прочность материала и особенно, его коррозионную стойкость. Кроме того, способ применяется для облагораживания поверхности, т. е. для уменьшения шероховатости, устранения пор, трещин и т. д.

Порядок выполнения работы

1. Включить лазерную установку согласно техническому описанию.

2. Расположить присадочный материал (проволока диаметром $0,5 \cdot 10^{-3}$ м) относительно лазерного пучка по схеме, представленной на рисунке 3.2.

3. Установить частоту следования импульсов лазерного излучения 5 Гц и расход подачи технологического газа в зону наплавки (3–4 л/мин). Скорость перемещения координатного стола указывает преподаватель.

4. Провести исследования зависимости величины коэффициента формы валика наплавки для сталей 30ХГСА, Х18Н10Т от энергии и длительности импульсов лазерного излучения (значения указаны в таблице 3.1).

5. Построить графики зависимости коэффициента формы валика наплавки от энергии при заданных значениях длительности импульсов лазерного излучения.

6. Исследовать влияние степени расфокусировки объектива на формирование формы валика наплавки в зоне лазерного воздействия.

7. Составить отчет о проделанной работе.

Таблица 3.1 – Величина коэффициента формы валика наплавки для сталей 30ХГСА, Х18Н10Т в зависимости от энергии и длительности импульсов лазерного излучения

$E_{им},$ Дж	Коэффициент формы валика наплавки для длительности импульса ЛИ (τ).							
	$4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$		$6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$		$8 \cdot 10^{-3} \text{ с}$		$10 \cdot 10^{-3} \text{ с}$	
	30ХГСА	Х18Н10Т	30ХГСА	Х18Н10Т	30ХГСА	Х18Н10Т	30ХГСА	Х18Н10Т
4								
6								
8								
10								
12								
14								

Вопросы для самоконтроля

1. Какие основные методы лазерной наплавки материалов существуют?

2. Назовите типы лазеров применяемых в газолазерной наплавке.

3. Каковы особенности импульсной наплавки компактных присадочных материалов?

4. Какие основные факторы влияют на процесс наплавки материалов?

5. Какие методы легирования и аморфизации поверхностей деталей существуют?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

ЛАЗЕРНАЯ ИМПУЛЬСНАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ

Цель работы: приобретение представлений о процессах импульсной лазерной сварки металлов и сплавов, а также приобретение навыков проведения сварки деталей из конструкционных сталей, нержавеющей, алюминиевых и титановых сплавов.

Оборудование: лазерная технологическая установка, металлографический микроскоп, измеритель энергии лазерного излучения, осциллограф, образцы из конструкционных сталей, нержавеющей, алюминиевых и титановых сплавов.

Теоретические сведения

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

Процесс лазерной сварки происходит по следующей схеме: излучение лазера направляется на фокусирующую систему, после которой формируется в пучок заданных размеров и направляется на поверхность свариваемых деталей, где частично отражается, а основная часть излучения поглощается материалом вызывая его нагрев и поглощение.

Лазерная сварка применяется для получения прецизионных конструкций благодаря малым размерам сварного шва и околошовной зоны.

После сварки не нужны правки и механическая обработка. По техническим признакам лазерную сварку подразделяют на сварку с глубоким проплавлением и сварку металлов малых толщин.

Лазерная сварка с глубоким проплавлением обеспечивает соединение металлов толщиной более 1 мм и выполняется лазерами как непрерывного действия, так и импульсно-периодического. Малыми при лазерной сварке считаются толщины материалов менее 1 мм. В отличие от сварки с глубоким проплавлением при

сварке материалов малых толщин является отсутствие значительного перегрева и интенсивного испарения расплавленного металла шва.

При непрерывном режиме работы лазера выполняется шовная сварка, а применение импульсно-периодического излучения позволяет выполнять и точечную сварку, шов формируется перекрытием отдельных точек.

Высокая плотность мощности на поверхности свариваемых деталей, обеспечиваемая лазерными источниками излучения, обуславливает высокий темп нагрева, что облегчает сварку металлов, обладающих большой теплопроводностью (медь, серебро) и высокой температурой плавления (вольфрам, тантал, молибден). При сварке металлов лазерное пятно, получаемое на поверхности свариваемых деталей при фокусировке излучения, является поверхностным источником нагрева, так как излучение поглощается тонким поверхностным слоем толщиной в несколько сотых долей микрона. При плотностях мощности 10^5 – 10^6 Вт/см² и длительности порядка 10^{-3} – 10^{-2} с передача тепла в глубину свариваемых материалов осуществляется в основном за счет теплопроводности.

Необходимая минимальная плотность мощности излучения лазера q_0 , обеспечивающая температуру плавления $T_{пл}$ металла без выплеска, может быть оценена по формуле:

$$q_0 = \frac{(T_{пл} - T_0) \cdot k \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot 1 - R \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}, \quad (4.1)$$

где: T_0 – начальная температура,

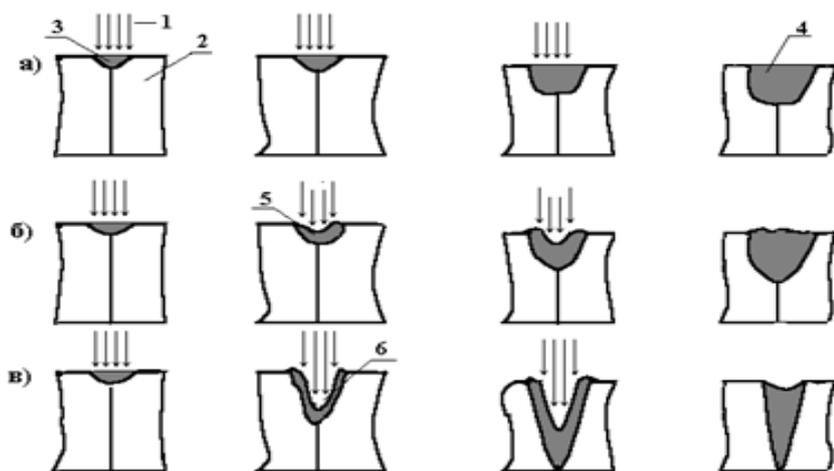
a – температуропроводность материала,

τ – время воздействия,

k – теплопроводность материала.

Оптимальный диапазон длительностей импульсов находится: для стали $5 \cdot 10^{-3}$ – $8 \cdot 10^{-3}$ с, для меди $2 \cdot 10^{-4}$ – $5 \cdot 10^{-4}$ с, для алюминия $5 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-3}$ с. Более точные значения длительности импульса определяются экспериментальным путем или исходя из технических возможностей установки.

Стадии развития процессов проплавления при различных плотностях мощности излучения показаны на рисунке 4.1. Зона проплавления в этом случае имеет форму, близкую к сферической.



- 1 – излучение лазера; 2 – свариваемые детали; 3 – расплавленный металл;
 4 – застывшая сварочная ванна; 5 – объем углубления;
 б – временное отверстие, полученное за счет испарения.
 а) – проплавление за счет теплопроводности, $q = 10^5 - 10^6$ Вт/см²
 б) – прогиб сварочной ванны, $q = 5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^6$ Вт/см²
 в) – глубокое проплавление, $q = 10^6 - 10^7$ Вт/см²

Рисунок 4.1 – Стадии развития процессов проплавления при различных плотностях мощности излучения

Практически при лазерной сварке в большинстве случаев наблюдается интенсивное испарение металла. Это приводит к тому, что под давлением пара поверхность сварочной ванны прогибается. Участок этой поверхности, непосредственно воспринимающий энергию излучения, опускается (рисунок 4.1 б)). Если при этом поверхностное натяжение расплавленного металла еще препятствует его выплеску, то после окончания действия излучения еще не застывший металл заполняет образовавшееся углубление. В результате прогиба сварочной ванны глубина проплавления увеличивается по сравнению с нагревом без заметного испарения. Форма зоны проплавления становится конической (рисунок 4.1 б), в)). Увеличению глубины проплавления при интенсивном испарении с поверхности сварочной ванны способствует перемешивание верхних, нагретых до наибольшей температуры, и нижних, более холодных слоев расплавленного металла, которое возникает из-за неравномерного нагрева в пределах светового пятна. При увеличении плотности мощности в центре светового пятна до величины порядка $5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^7$ Вт/см² в сварочной ванне образуется узкое глубокое отверстие, металл из которого частично испаряется, частично вытесняется к периферии ванны (рисунок 4.1 в)). После окончания

действия импульса временное отверстие заполняется металлом, расплавленным в периферийной зоне светового пятна, где плотность мощности была недостаточна для интенсивного испарения. Увеличению эффекта глубокого проплавления способствует пиковая структура импульсных твердотельных лазеров, так как за время действия одного пика плотность мощности в центре светового пятна может достигать 10^7-10^8 Вт/см². Изменение энергетических характеристик лазерного излучения позволяет осуществлять сварку, пользуясь различными механизмами проплавления, выбор которых зависит от свойств свариваемых материалов и характера соединения.

При воздействии светового потока на поверхность свариваемых деталей часть его отражается. Для всех металлов коэффициент отражения увеличивается с увеличением длины волны света. В таблице 4.1 приведены коэффициенты отражения некоторых металлов. В процессе нагрева поглощательная способность многих металлов заметно увеличивается с ростом температуры. Например, у серебра и меди при воздействии излучения с длиной волн $\lambda = 1,06$ мкм она увеличивается примерно в два раза при нагреве от комнатной температуры до температуры плавления. В то же время у стали изменение оптических характеристик в том же интервале температур невелико.

Таблица 4.1 – Коэффициенты отражения (R) некоторых металлов для излучения с различной длиной волн

Металл	Длина волны, мкм		
	0,7	1,06	10,6
Алюминий	0,87	0,93	0,97
Хром	0,56	0,58	0,93
Медь	0,82	0,91	0,98
Никель	0,68	0,75	0,95
Серебро	0,95	0,97	0,99
Сталь	0,58	0,63	0,93–0,95

Следует отметить, что увеличение длительности лазерного импульса способствует более полному удалению из сварочной ванны нерастворенных газов и уменьшает возможность образования пористости после застывания металла. Наиболее благоприятной формой импульса излучения при сварке является трапециидальная или треугольная с относительно крутым передним и пологим задним фронтом. В течение первой части импульса проплавляется основная часть металла, реализуется режим глубокого проплавления. За время

относительно медленного спада интенсивности во второй части импульса увеличивается количество жидкой фазы за счет плавления металла у краев сварочной ванны. Затягивание заднего фронта импульса способствует заполнению углубления.

На рисунке 4.2 показаны зависимости глубины и диаметра зоны проплавления некоторых металлов, от энергии излучения лазера на стекле с неодимом (при постоянных длительности импульса и диаметре светового пятна).

Сплошной шов при импульсной лазерной сварке формируется путем наложения лазерных пятен друг на друга с перекрытием их на поверхности свариваемого материала. Для расчета скорости сварки вводится коэффициент перекрытия:

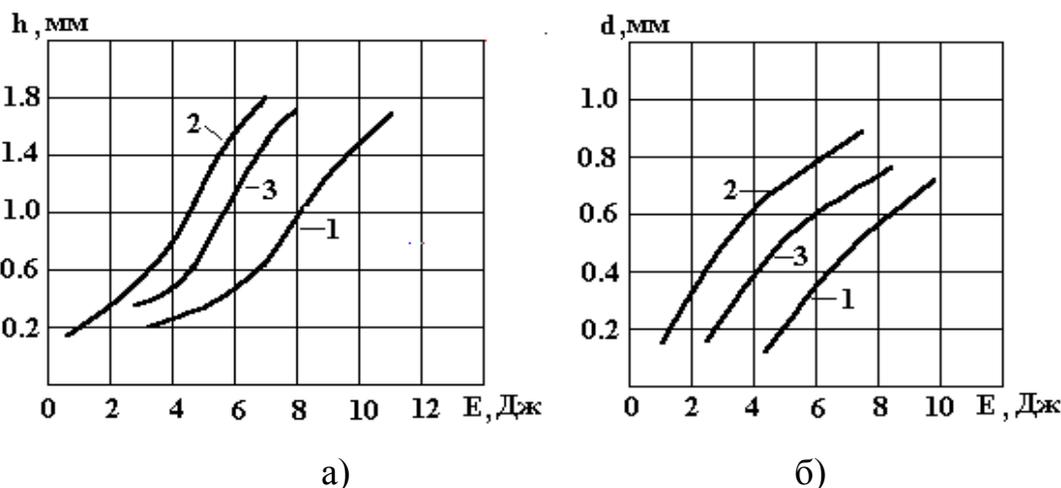
$$K = L/D, \quad (4.1)$$

где L – длина перекрытия сварных лазерных пятен;

D – диаметр лазерного пятна.

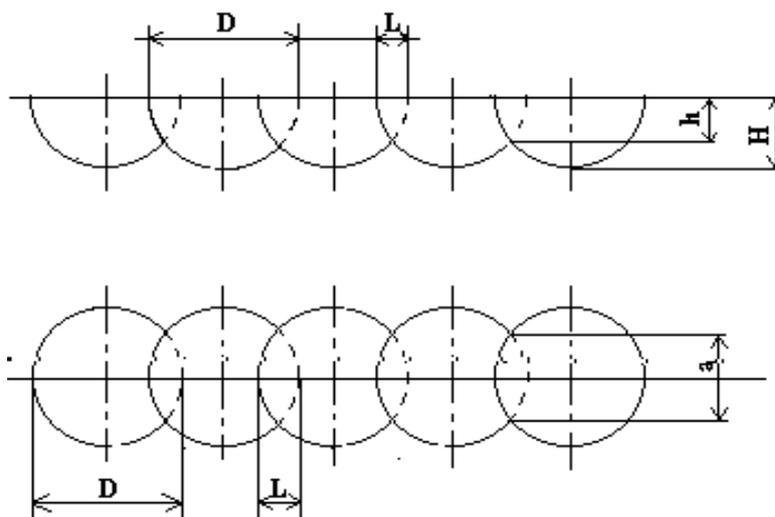
Геометрические характеристики шва при импульсной сварке лазерным пучком круглого сечения показаны на рисунке 4.3.

Поскольку сварная точка при лазерной сварке имеет сферическую или коническую форму, то глубина шва h зависит от коэффициента перекрытия K . Выбор коэффициента перекрытия определяется необходимой минимальной глубиной проплавления, от которой, в свою очередь, зависит прочность и герметичность шва. Для обеспечения наибольшей прочности глубина шва должна быть близка к максимальной глубине проплавления, а коэффициент перекрытия $K = 1$.



Длительность импульса 4 м/с; диаметр светового пятна 0,5 мм;
1 – медь (Cu); 2 – никель (Ni); 3 – молибден (Mo)

Рисунок 4.2 – Зависимость глубины (а) и диаметра (б) зоны проплавления от энергии излучения



h – глубина шва; H – максимальная глубина проплавления; a – ширина шва.

Рисунок 4.3 – Схема образования и характеристики сварного шва

Скорость сварки при этом мала. Ее можно определить по формуле:

$$V = f \cdot D(1 - K), \quad (4.2)$$

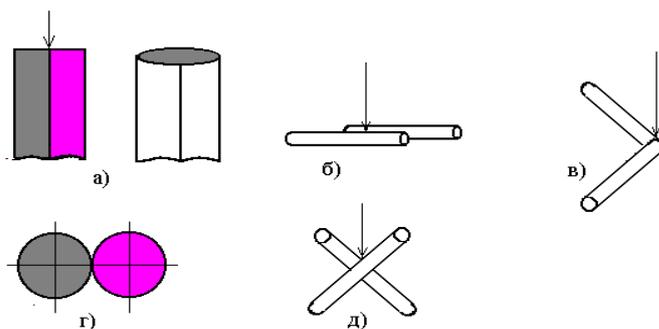
где f – частота следования импульсов излучения лазера.

Основными требованиями для многих технологических процессов при сварке материалов являются обеспечение герметичности и вакуумной плотности шва. Внешний вид сварного шва такого изделия, показан на рисунке 4.4. Значения глубины шва лежат в пределах 0,1–0,3 мм, коэффициента перекрытия 0,3–0,5.



Рисунок 4.4 – Внешний вид сварного шва

На рисунке 4.5 представлены основные типы соединений. Как и при обычной сварке, процесс может осуществляться как на воздухе, так и в атмосфере инертных газов с целью исключения процессов окисления металлов в расплаве (появление окислов в расплаве приводит к ослаблению сварного соединения). Подача газа происходит через специальное сопло. Обычно расход газа при сварке – 10^{-3} – 10^{-4} м³/с.



- а) встык, б) внахлест; в) угловое соединение; г) схема светоловушки;
 д) соединение скрещивающихся проволок.
 Стрелками показано направление падения лазерного пучка.

Рисунок 4.5 – Типы соединений

Порядок выполнения работы

1. Изучить особенности импульсной сварки металлов лазерным излучением. Оценить критическую энергию лазерного излучения для плавления образцов без выплеска металла, из конструкционных сталей, нержавеющей, алюминиевых и титановых сплавов.

2. Провести лазерную точечную сварку двух образцов (из конструкционных сталей, нержавеющей, алюминиевых и титановых сплавов) при соединении их встык и внахлест. Выбрать оптимальные режимы сварки.

3. Выполнить импульсную шовную сварку. Определить оптимальные режимы для частоты следования импульсов излучения 2; 5; 10 Гц.

4. Проанализировать стадии развития процессов плавления при подаче в зону сварки аргона и воздуха.

5. Провести шовную сварку с использованием присадочного материала.

6. Составить отчет о проделанной работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы особенности лазерного излучения как источника нагрева при сварке?

2. Как характеристики излучения влияют на результаты сварки?

3. Опишите схему образования сварочной ванны.

4. Какие основные типы сварных соединений лазерным пучком существуют?

5. Как влияет газовая среда на процесс плавления металлов?

ЛИТЕРАТУРА

1. Мышковец, В. Н. Лазерная технология обработки материалов : лабораторный практикум / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2001. – 83 с.
2. Мышковец, В. Н. Методы поверхностной лазерной обработки металлов и сплавов : лабораторный практикум / В. Н. Мышковец, А. В. Максименко, Ю. В. Никитюк. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2013. – 87 с.
3. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц; под ред. А. Г. Григорьянца, И. Н. Шиганова, А. И. Мисюрова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 73 с.
4. Шахно, Е. А. Математические методы описания лазерных технологий : учеб. пособие / Е. А. Шахно. – СПб : ГУИТМО, 2002. – 82 с.
5. Вейко, В. П. Лазерные микро– и нанотехнологии в микроэлектронике / В. П. Вейко. – Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2011. – 141 с.
6. Делоне, И. Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом : курс лекций / И. Б. Делоне. – М. : Наука, 1980. – 280 с.
7. Действие излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов [и др.]. – М. : Наука, 1970. – 207 с.
8. Вейко, В. П. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии». Раздел: Введение в лазерные технологии / В. П. Вейко. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2009 – 143 с.
9. Взаимодействие лазерного излучения с металлами / А. М. Прохоров [и др.]. – Бухарест : Academiei; М. : Наука, 1988. – 537 с.
10. Альтудов, Ю. К. Лазерные микротехнологии и их применения в электронике / Ю. К. Альтудов, А. Г. Гарицын. – М. : Наука, 2001. – 632 с.
11. Климков, Ю. М. Лазерная техника : учеб. пособие / Ю. М. Климков, М. В. Хорошев. – М. : МИИГАиК, 2014. – 143 с.
12. Мурзин, С. П. Лазерные технологии обработки материалов : учеб. пособие / С. П. Мурзин, В. Н. Илюхин. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. – 98 с.
13. Ковалев, О. Б. Физические основы лазерной резки тонких листовых материалов / О. Б. Ковалев, В. М. Фомин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 256 с.

Производственно-практическое издание

Мышковец Виктор Николаевич,
Купо Александр Николаевич,
Максименко Александр Васильевич,
Баевич Георгий Александрович

ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

**Технологические процессы лазерной обработки
металлов и сплавов**

Практическое пособие

Редактор *В. И. Шкредова*
Корректор *В. В. Калугина*

Подписано в печать 17.06.2019. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,3.
Уч.-изд. л. 2,5. Тираж 25 экз. Заказ 506.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.
Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.

