Энгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Методические указания к практическим работам по дисциплинам «Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов» и «Технология размерной обработки электрофизическими и электрохимическими методами» для студентов направлений

15.03.05«Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

очное и заочной форм обучения

Энгельс 2026

ВВЕДЕНИЕ

Среди различных видов современных технологий обработки материалов особая роль принадлежит лучевым технологиям, которые основаны на воздействии на поверхность материала высококонцентрированных узконаправленных лучевых потоков или высокоэнергетичных струй – потока ускоренных заряженных частиц (электронов), светового луча высокой энергии, формируемого с помощью лазеров.

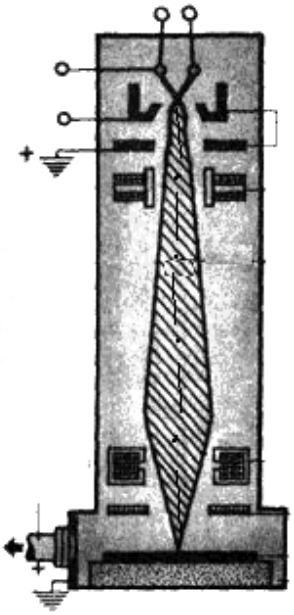
Отличительными особенностями лучевых методов являются высокая концентрация энергии на обрабатываемой поверхности, локальность и высокоскоростной характер воздействия.

Одна из ведущих технологий, во многом определяющих современный уровень производства в промышленно развитых странах, – лазерная технология, результатами применения которой в различных видах производств являются высокое качество получаемых изделий и возможность достижения их миниатюризации, достаточно высокая производительность процессов, обеспечение прецизионности обработки, экономия материальных ресурсов, экологическая чистота, повышение культуры производства.

Лазерная обработка применима для самых разнообразных материалов (металлов, твердых сплавов, керамики, стекла, пластмасс, резин, полупроводниковых материалов, драгоценных камней, биологических материалов) во многих отраслях промышленности – в микроэлектронике, в машиностроении, в промышленности строительных материалов, в медицине, в сельском хозяйстве, в ювелирной промышленности и т.д.

Технологии, основанные на использовании лазерного излучения, могут быть успешно интегрированы в технологические цепочки получения изделий в комбинации с традиционными широко применяемыми процессами, например, процессами литья.

В данных методических указаниях рассматриваются основные технико-экономические показатели применения лазеров для различных операций обработки материалов – обработки отверстий, резки, сварки; технические показатели используемого лазерного оборудования; особенности технологий изготовления основных конструктивных элементов лазеров.



ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

«ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- ♦ ознакомиться с процессами электронно-лучевой обработки (ЭЛО) материалов и устройством установок для ее реализации;
- ♦ ознакомиться с основными технологическими показателями ЭЛО;
- ♦ произвести расчет основных параметров режима ЭЛО.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Общая характеристика электронно-лучевой обработки

Электронно-лучевой обработкой (ЭЛО) называют группу способов микрообработки поверхности материалов, при которых в технологических целях используют термическое или нетермическое воздействие на обрабатываемый материал высокоэнергетичного сфокусированного потока электронов.

При *термической обработке* в результате плавления и испарения (температура на поверхности обрабатываемого материала в локальной зоне воздействия может составлять до 5000…6000 °С) происходит вынос материала из зоны действия пучка и термические превращения материала.

Так как диапазоны мощности и концентрации энергии в луче велики, то практически возможно получение всех видов термического воздействия на материалы: нагрев до заданных температур, плавление и испарение с высокой скоростью.

При *нетермической обработке* используются химические или физические превращения в материале при воздействии на него электронного пучка.

В обоих случаях цель обработки заключается в изменении формы и структуры заготовки; эта цель достигается соответствующим управлением воздействием пучка на заготовку в пространстве и во времени.

Высокая плотность потока излучения энергии в локальном участке обработки (плотность мощности q составляет $10^2…10^{13}$ Вт/м^2 в зависимости от режима) достигается ускорением электронов электрическим полем высокой мощности (ускоряющее напряжение U изменяется от 10 кВ до 5 МВ в современных сверхвысоковольтных установках) и фокусировкой потока на микроучастке.

Варьирование параметров режима ЭЛО позволяет реализовать следующие технологии обработки материалов, рис. 2.1: размерную обработку (в т.ч. фрезерование, сверление), микро- макросварку, химико-термическую, термическую обработку (с целью повышения, например, твердости), рафинирующий переплав, нетермическую обработку (локальное изменение состава и структуры для применения в микроэлектронике, в технике записи и хранения информации), полимеризацию, нанесение покрытий толщиной от

нескольких микрометров до десятых долей миллиметра на поверхности заготовок и изделий.

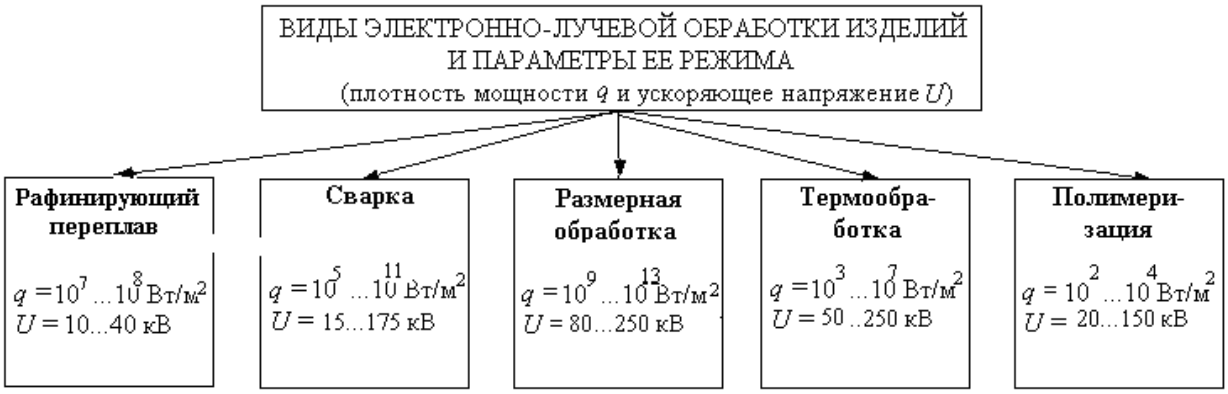


Рисунок 2.1 – Различные виды электронно-лучевой обработки

Метод ЭЛО целесообразен при обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов, в т.ч. легкоокисляющихся активных металлов и сплавов, тугоплавких металлов; возможна обработка твердых и высоколегированных сплавов, керамики, алмаза, рубина, кварца, полупроводниковых материалов (германия, кремния).

Тепловые и технологические эффекты, реализуемые при ЭЛО, а также обрабатываемые материалы приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Тепловые эффекты в материалах, обрабатываемых ЭЛО

Тепловой эффект	Технологический эффект	Материалы
Фазовые превращения в твердом состоянии	Закалка	Стали, поддающиеся закалке
Сублимация	Вынос материала (выполнение отверстий, пазов; гравирование; резка)	Алмаз, графит, кварцевое стекло
Разложение твердого материала с образованием летучих компонентов	То же	Целлюлоза (бумага), различные синтетические материалы, керамика
Разложение с образованием по крайней мере одной твердой компоненты	То же	Арсенид галлия, фосфид галлия
Плавление	Микросварка; полирование; нанесение рисок оплавлением	Металлы; кремний, германий, керамика; ферриты
Испарение, квазисублимация	Вынос материала (выполнение отверстий, пазов; гравирование; резка)	Металлы, синтетические материалы, диэлектрические материалы
Ударные волны	Дробление материалов	Камень

Широкие возможности автоматизации электронно-лучевой обработки материалов, ведение процесса в вакууме (т.е. обеспечение высокой чистоты обрабатываемого материала), концентрация энергии в электронном луче до значений, недоступных ранее известным источникам, – все это способствовало внедрению ЭЛО во многих отраслях.

Достижения в области электронно-лучевой технологии привели к тому, что электронный луч стал заурядным технологическим инструментом, начиная от осаждения пленок в интегральных микросхемах до сварки крупногабаритных и металлоемких изделий в тяжелом машиностроении.

2.2. Установки для электронно-лучевой обработки

Установки для ЭЛО включают следующие узлы:

- одну или несколько электронных пушек с источниками питания для создания ускоренного пучка электронов;
- рабочую камеру с внутрикамерной технологической оснасткой (оснастка включает в себя многокоординатные манипуляторы с внешним управлением для перемещения деталей относительно луча);
- вакуумную систему, обеспечивающую поддержание технологического вакуума;
- систему автоматического управления.

Электронная пушка с источником питания (электронно-лучевой агрегат) является основным функциональным блоком электронно-лучевой установки и предназначена для генерации, ускорения и фокусировки, а иногда и отклонения электронного пучка.

Принцип устройства электронной пушки в установках для ЭЛО во многом аналогичен просвечивающим электронным микроскопам (ПЭМ), рис. 2.2.

К ***рабочим камерам*** электронно-лучевых установок предъявляется ряд общих требований.

♦ Рабочая камера должна быть газонепроницаемой и обладать достаточной прочностью, чтобы выдержать атмосферное давление при создании вакуума внутри камеры.

♦ В качестве материала камеры лучше применять нержавеющую сталь.

♦ Толщину стенки камеры выбирают из условий прочности с учетом обеспечения непроницаемости для рентгеновского излучения.

♦ Камера снабжается смотровыми окнами для наблюдения за процессом.

Толщина стекла и его качество должны обеспечивать прочность, герметичность и защиту от рентгеновского излучения.

♦ Камера должна иметь люки, обеспечивающие загрузку изделий, подлежащих электронно-лучевой обработке.

Вакуумные камеры для электронно-лучевой обработки являются одним из наиболее важных узлов установки для электронно-лучевой обработки. От их формы, конструкции, жесткости и габаритов зависят размеры и качество обрабатываемых за одну откачку изделий, удобство их загрузки и выгрузки, возможность пристыковки дополнительных объемов в нужном направлении.

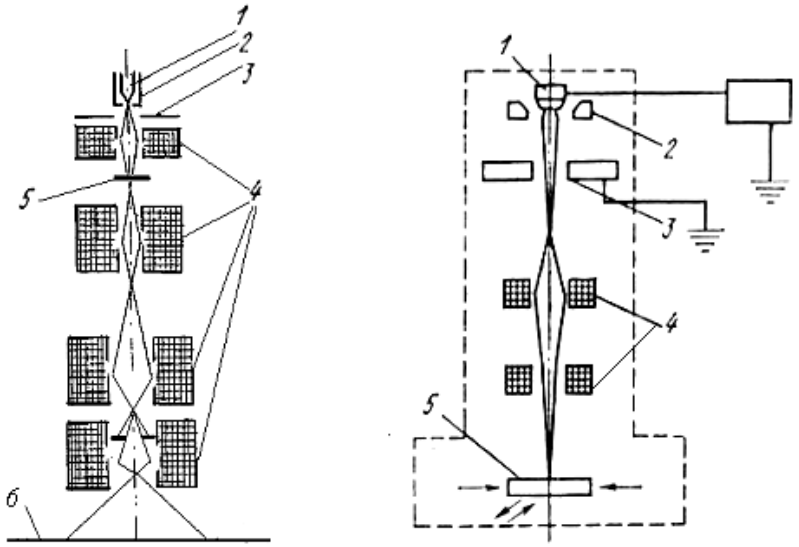


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема устройства просвечивающего электронного микроскопа (*а*) и рабочей камеры установки для электронно-лучевой обработки (*б*): *1, 2, 3* – электронная пушка (*1* – катод, *2* – фокусирующий электрод, *3* – анод); *4* – блок электромагнитных линз; *5* – объект; 6 – изображение в ПЭМ

По степени специализации различают два типа камер: универсальные и специализированные.

Универсальные камеры предназначены для обработки изделий любой формы и габаритов в пределах габаритов камеры. Такие камеры используются в единичном и мелкосерийном производстве и выпускаются в соответствии с принятыми параметрическими рядами. Это дает возможность выбрать камеры наиболее подходящих размеров применительно к конкретным изделиям.

Специализированные камеры неразрывно связаны с конструкцией и габаритами конкретного изделия или группы изделий. Часто специализированные камеры выполняют по форме обрабатываемого изделия.

Вакуум при электронно-лучевой обработке необходим как для создания и формирования электронного пучка, так и для защиты обрабатываемого

металла от действия кислорода и азота воздуха, ускорения дегазации металла при плавлении, удаления некоторых вредных примесей и т.д.

Вакуумная система установки выполняется на базе стандартных вакуумных установок, может иметь несколько независимых контуров откачки, оснащается турбомолекулярными, криогенными или диффузионными насосами и средствами измерения вакуума. Управление элементами вакуумной системы осуществляется с помощью микроконтроллера.

Как правило, современные установки для ЭЛО выпускаются *многофункциональными*, интегрирующими такие виды обработки, как сварка, пайка, термическая очистка, зональный отжиг и закалка, наплавка и модифицирование поверхности. Преимуществами использования таких установок являются повышение качества изделий (при переходе от одного к другому виду обработки сохраняется идеальная рабочая среда – вакуум), сокращение в десятки и сотни раз межоперационного времени, экономное расходование энергии, более полная загрузка оборудования в условиях мелкосерийного и единичного производства.

2.3. Основные операции размерной электронно-лучевой обработки и ее технологические показатели

К основным характерным операциям размерной ЭЛО можно отнести:

– *изготовление сквозных и глухих отверстий* в кремниевых и ситалловых подложках, рубиновых часовых камнях, при изготовлении алмазных волок, топливной аппаратуры ДВС и других изделий (в т.ч. получение отверстий с большим отношением глубины к диаметру – «кинжальное» проплавление). Метод обеспечивает получение отверстий d = 10…500 мкм с максимальной глубиной h_{max}= 10 мм для металлов, 15…20 мм для неметаллов;

– *перфорация отверстий* при изготовлении фильтров, тонких сеток, «потеющих» поверхностей для охлаждения камер сгорания и лопаток турбин. На этой операции получают отверстия диаметром 15…300 мкм с максимальной глубиной h_{max} = 3…5 мм со скоростью до 5000 отв/с;

– *получение отверстий фигурной или цилиндрической формы в машиностроительных деталях повышенной точности* из твердых материалов типа опорных подшипников в точных приборах;

– *формообразование деталей сложной формы из листа и пластин с* использованием контурной резки. Ширина реза составляет 0,015…0,4 мм при глубине до 8 мм;

– *изготовление интегральных схем, p-n – переходов, резисторов, некоторых типов транзисторов в микроэлектронике*.

При размерной ЭЛО используют испульсный режим работы установок.

Продолжительность импульсов и интервалы между ними выбирают так, чтобы за один цикл успел нагреться и испариться только металл, находящийся под непосредственным воздействием луча. Длительность импульсов обычно составляет 10^{-4}…10^{-6} с, а частота 50…6000 Гц.

Для прецизионной размерной обработки деталей (сверления, фрезерования, резки) используют в основном высоковольтные установки (80…250 кВ) небольшой мощности (до 1 кВт), обеспечивающие концентрацию энергии свыше 10^9 Вт/м^2, см. рис. 2.1.

Формируемые в результате ЭЛО поверхности определяются траекторией взаимного перемещения луча и детали. Устанавливаемый в камере манипулятор позволяет придавать заготовке поступательное и вращательное движение, а расположенная в электронной пушке электромагнитная система развертки позволяет сканировать (перемещать) электронный пучок по заданному контуру.

Технологические характеристики ЭЛО (производительность, точность, качество поверхности) определяются возможностями оборудования, энергетическими параметрами электронного пучка, свойствами обрабатываемого материала.

Производительность ЭЛО (скорость съема материала) зависит от мощности луча, размеров участка, на котором он фокусируется, от теплофизических характеристик и толщины обрабатываемого материала; может достигать 20…30 мм^3/мин, но на чистовых режимах, обеспечивающих высокое качество поверхности, не превышает 1 мм^3/мин.

Зависимость производительности от свойств металлов и сплавов характеризуется их относительной обрабатываемостью, табл. 2.2, которая не зависит от механических свойств материала, а определяется теплофизическими характеристиками – температурой плавления, теплоемкостью, удельной теплотой испарения и т.д.

Точность ЭЛО также определяется энергетическими параметрами луча, стабильностью этих параметров, системой фокусировки излучения, точностью выполнения механической части оборудования. При оптимальном выборе режимов допуски при ЭЛО составляют ± 5 мкм.

Шероховатость поверхности составляет 0,08…0,4 мкм (R_a) при получении отверстий; ~ 0,8 мкм (R_a) …40 мкм (R_z) при контурной резке.

Таблица 2.2 – Относительная обрабатываемость материалов ЭЛО

Материал	Относительная обрабатываемость
Медь	1
Алюминий	0,7
Железо	6
Вольфрам	0,09
Молибден	0,08
Титан	10
Феррит	40
Кварц	20
Стекло	35

3. ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с сущностью и основными процессами электронно-лучевой обработки материалов.

2. На примере просвечивающего электронного микроскопа УЭМВ-100К ознакомиться с основными конструктивными узлами установок для ЭЛО, регулируемыми параметрами режима обработки, устройством вакуумной системы, применяемыми мерами защиты обслуживающего персонала.

3. В соответствии с исходными данными, приведенными в табл. 3.1, определить основные параметры режима электронно-лучевой обработки:

♦ мощность $W_и$ (Вт/с) электронного пучка в импульсе :

$$W_и = IUf, \qquad (3.1)$$

где U – ускоряющее напряжение, кВ; I – ток фокусирующей системы (определяет диаметр электронного луча d, мкм), мА; f – частота следования импульсов, Гц;

♦ плотность мощности излучения q (Вт/м^2), т.е. отношение мощности излучения к площади его воздействия на обрабатываемую поверхность:

$$q = \frac{IU}{(\pi D^2/4)}, \qquad (3.2)$$

где D – диаметр образуемой лунки на поверхности материала, обычно на 10…15 % больше d.

4. На основании заданных (табл. 3.1) и рассчитанных параметров режима, а также данных, приведенных на рис. 2.1, рекомендовать оптимальный вид ЭЛО. Обосновать результаты.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета основных параметров режима электронно-лучевой обработки металлов

№ варианта	*I*, мА	*U*, кВ	*d*, мкм	*f*, Гц
1,21	8	80	10,0	1500
2,22	10	80	15,0	1650
3,23	12	80	18,0	1700
4,24	14	80	23,0	1800
5,25	16	80	26,0	2000
6,26	18	15	28,0	500
7,27	20	20	31,0	600
8,28	22	40	33,0	800
9,29	24	60	35,0	1000
10,30	26	80	36,0	1200
11	28	100	38,0	2200
12	30	150	41,0	2500
13	32	200	43,0	3300
14	34	80	46,0	1750
15	36	60	49,0	1200
16	38	60	51,0	1100
17	40	40	53,0	700
18	42	30	55,0	650
19	44	20	57,0	520
20	46	15	62,0	480

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Основные технологии электронно-лучевой обработки материалов.
3. Принципиальная схема установки для ЭЛО.
4. Основные технологические показатели процесса размерной ЭЛО и их числовые значения.
5. Расчет основных параметров режима электронно-лучевой обработки.
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. В чем сущность электронно-лучевой обработки материалов?
2. Назовите основные электронно-лучевые технологии обработки материалов.
3. Для каких материалов целесообразна электронно-лучевая обработка?
4. Каковы основные узлы электронно-лучевых установок?
5. Что представляет собой электронная пушка?

6. Какие требования предъявляются к рабочим камерам электронно-лучевых установок?
7. Каково назначение вакуумной среды в электронно-лучевых установках?
8. В чем специфика универсальных и специальных вакуумных камер для ЭЛО?
9. Какие физические процессы развиваются в зоне взаимодействия электронного луча с обрабатываемым материалом?
10. Что понимают под режимом ЭЛО?
11. Укажите основные параметры режима при реализации различных видов обработки материалов электронным лучом.
12. Каковы основные технологические показатели ЭЛО?
13. Укажите показатели производительности, точности и качества, достигаемые при ЭЛО.
14. От чего зависит обрабатываемость материалов ЭЛО?
15. Назовите наиболее характерные операции размерной ЭЛО.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

«ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

♦ ознакомиться с основными техническими характеристиками лазеров различного типа;

♦ изучить методику расчета технических характеристик технологических лазеров.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Технологические лазеры и их основные характеристики

Т.к. большинство технологических применений лазеров основано на тепловом действии света, к ***технологическим лазерам*** относят лазеры, которые способны нагреть объект воздействия до температур, при которых в обрабатываемом материале происходят те или иные физические процессы, например, изменение фазового состояния и структуры, химические реакции, физические переходы – плавление, испарение и т.д.

К основным техническим параметрам современных технологических лазеров относятся следующие характеристики.

♦ ***Длина волны генерируемого излучения*** λ, мкм.

В лазерах современного уровня диапазон длин волн составляет от 10 нм до 1 мм, рис. 2.1.

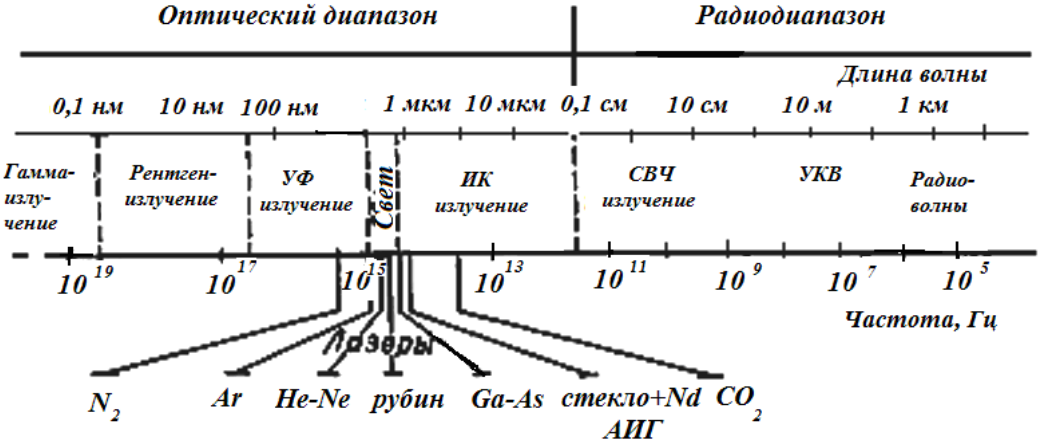


Рисунок 2.1 – Электромагнитный спектр и диапазон длин волн, в котором получено лазерное излучение

Длина волны технологических лазеров должна лежать в области наибольшей поглощающей способности материала: для металлов – в видимой, для стекла – в инфракрасной, для полимеров и пластмасс – в ультрафиолетовой.

Поглощаяющая способность зависит, в первую очередь, от оптических характеристик материала – коэффициента отражения R, коэффициента по-

глощения $A = 1 - R$, показателя поглощения α. Глубина проникновения излучения $\delta = 1/\alpha$.

♦ ***Мощность излучения*** P, Вт.

Средняя мощность излучения современных лазеров $P_{ср}$ составляет от нескольких милливатт до 10^6 Вт (1 МВт).

Эту величину можно рассматривать как *критерий технологических лазеров*, поскольку процессы лазерной обработки связаны с тепловым действием излучения. С точки зрения теплофизического подхода к лазерному воздействию на материалы к технологическим лазерам относят лазеры, которые способны нагреть поверхность до заданной температуры.

Например, в случае размерной обработки (нагрев до температуры испарения) достаточная мощность для большинства материалов как в непрерывном режиме работы лазера, так и в импульсном $P \approx 10^3$ Вт.

♦ ***Плотность мощности излучения*** непрерывных и импульсных лазеров q, Вт/м^2 – наиболее важный параметр теплового воздействия лазерного излучения.

Под плотностью мощности q понимают мощность P, поглощенную единицей площади пятна фокусировки S:

$$q = P/S. \qquad (2.1)$$

Так как $P = E/\tau$, где E – энергия в импульсе, τ – его длительность, площадь пятна фокусировки в общем случае $S = \pi d^2/4$ (d – диаметр пятна фокусировки, в зависимости от технологической задачи составляет 0,001…0,2 мм), плотность мощности импульсного излучения

$$q_{имп} = E/\tau S = 4E/\pi d^2\tau. \qquad (2.2)$$

Для непрерывного излучения плотность мощности

$$q_{непр} = P_{ср}/S. \qquad (2.3)$$

В современных лазерах q составляет от 10^{10} до 10^{24} Вт/м^2. Для сравнения – плотность мощности излучения на поверхности Солнца – 10^{12} Вт/м^2.

♦ Для импульсных лазеров – ***энергия импульса*** E, Дж, составляет 0,1…1000 Дж;

♦ ***Удельная поверхностная энергия*** W, Дж/м^2

$$W = Pt/S, \qquad (2.4)$$

где t – время действия излучения; P – мощность излучения в пятне фокусировки; S – площадь пятна фокусировки.

♦ ***Пиковая мощность импульсных лазеров*** $P_п$, Вт – максимальная мощность в импульсе, составляет до 10^{13} Вт,

$$P_п = E/\tau. \qquad (2.5)$$

♦ ***Частота следования импульсов*** *f*, Гц , составляет 0,1…10^3 Гц:

$$f = 1/T, \qquad (2.6)$$

где *T* – период следования импульсов.

♦ ***Длительность воздействия излучения*** *t*,с – это длительность импульса для импульсных лазеров ($\tau = 10^{-2}\ldots10^{-18}$ с) или время эффективного воздействия для непрерывных лазеров, которое определяется как

$$t = d/V_{ск}, \qquad (2.7)$$

где *d* – диаметр пятна в фокусе; $V_{ск}$ – скорость сканирования излучения.

Длительность воздействия излучения определяет многие характеристики процесса обработки – пороговую энергию процессов, глубину нагреваемого слоя, величину термомеханических напряжений, стабильность размера облучаемой зоны и т.д.

♦ Для обоих типов лазеров (непрерывного и импульсного излучения) – ***коэффициент полезного действия*** КПД – отношение мощности лазерного излучения к мощности возбуждения, подводимой к излучателю; составляет от десятых долей процента в твердотельных лазерах до десятков процентов (50 % и более) в полупроводниковых и волоконных лазерах.

♦ ***Угловая расходимость луча***

$$\theta = 1{,}22\ \lambda/d, \qquad (2.8)$$

составляет для различных типов лазеров от 0,2 (газовый He-Ne лазер) до 200 мрад (полупроводниковый GaAs-лазер).

Необходимо учесть также следующие аспекты:

♦ Приведенные численные значения параметров не являются предельными, поскольку лазерная техника непрерывно совершенствуется.

♦ Максимальные значения указанных характеристик достигаются не во всех лазерных установках, а преимущественно в установках, применяемых в фундаментальных исследованиях.

♦ Для оптимального выбора лазера имеет смысл рассматривать прежде всего его наиболее важные свойства, к которым относят длину волны и мощность.

Технические характеристики некоторых типов технологических лазеров приведены в табл.2.1.

Таблица 2.1 – Характерные параметры технологических лазеров

Название лазера	Активный элемент	Режим работы	Длина волны λ, мкм	Минимальный диаметр фокального пятна d, мкм	Энергия импульса E, Дж	Мощность излучения $P_{ф}$, Вт	Длительность импульса τ	Частота повторения импульсов f, Гц	Угловая расходимость излучения θ, мрад	КПД, %	Область применения
1. Твердотельные лазеры											
Лазер на алюмо-итриевом гранате с неодимом	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$	Имп.	1,06	5	1	До 10^4	10 мс	10^2	0,2…20	1…3	Обработка материалов, спектроскопия, датчики, научные исследования
Лазер на алюмо-итриевом гранате с неодимом	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$	Непрер.	1,06	5	-	10…2000	-	-	0,2…20	3	
Рубиновый лазер	$Cr:Al_2O_3$	Имп.	0,69	2	0,1…50	10^5…$5 \cdot 10^9$	20 пс…0,5 мс	До 10^2	0,4…10	1	Спектроскопия, медицина (офтальмология)
Титан-сапфировый лазер	$Ti:Al_2O_3$	Имп.	0,7…1,0	2	10^{-8}	50	10 фс…0,1 пс	10^8	0,4…10	<1	Фундаментальные исследования, (охлаждение и захват атомов и молекул), современные передовые технологии (атомная литография, оптическая метрология, высокоплотная запись информации)

Продолжение табл. 2.1

2. Газовые лазеры											
CO_2-лазер	CO_2	Имп.	10,6	30	0,5	До 10^3	0,1 … 10 мс	10^2… $2{,}5\cdot10^3$	0,4…10	20	Обработка материалов, медицина, научные исследования
CO_2-лазер	CO_2	Непрер.	10,6	30	-	До 10^3	-	-	0,4…10	20	
Гелий-неоновый лазер	He-Ne	Имп.	0,63	10	10^6… 10^{-3}	10^2	0,1 мкс	10^3	0,1…1	<1	Стереолитография, голография, измерения, датчики, научные исследования
На парах меди	Cu	Имп.	0,51… 0,58	20	10^{-3}	10^2	10 нс	10^4	0,03… 10	1	Научные исследования, обработка материалов
3. Полупроводниковые лазеры											
Арсенид-галлиевый лазер	GaAs	Имп.	0,635 …0,95	5	10^{-2}	10^3… $5\cdot10^3$	10 пс	10^3	0,2… 200	10… 15	Информационные технологии (оптическая связь, хранение информации, печать, сканеры), датчики, научные исследования, медицина
Фосфор-индиевый лазер	InP	Имп.	0,95… 1,55	5	10^{-2}	10…10^2	0,1 нс	10^3	0,2… 200	10… 15	

3. ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с основными техническими параметрами лазеров; оценить их максимальные значения для современных типов технологических лазеров.

2. По табл. 3.1 в соответствии с номером варианта выбрать лазер с определенным веществом активного элемента и, пользуясь данными табл. 3.2, табл. 2.1, указать:

- ♦ тип данного лазера;
- ♦ материал активного элемента;
- ♦ режим работы данного лазера;
- ♦ длину волны генерируемого излучения и соответствующий диапазон (в т.ч. принятое обозначение *ISO*), частоту и энергию излучения;
- ♦ минимальный диаметр фокального пятна *d*, мкм;
- ♦ угловую расходимость лазерного излучения;
- ♦ мощность лазера;
- ♦ его КПД;
- ♦ для импульсных лазеров:
  - энергию импульса;
  - его длительность;
  - частоту повторения импульсов.
- ♦ область применения данного лазера.

Таблица 3.1 – Исходные данные для определения основных технических характеристик технологических лазеров

№ варианта	Активный элемент лазера	Режим работы	Длина волны генерируемого излучения λ, мкм
1, 16	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$	Импульсный	1,06
2, 17	$Cr:Al_2O_3$	Импульсный	0,69
3, 18	CO_2	Импульсный	10,6
4, 19	$Ti:Al_2O_3$	Импульсный	0,7
5, 20	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$	Непрерывный	1,06
6, 21	CO_2	Непрерывный	10,6
7, 22	$Ti:Al_2O_3$	Импульсный	0,8
8, 23	He-Ne	Импульсный	0,63
9, 24	Cu	Импульсный	0,51
10, 25	GaAs	Импульсный	0,635
11, 26	$Ti:Al_2O_3$	Импульсный	1,0
12, 27	InP	Импульсный	0,95
13, 28	Cu	Импульсный	0,58
14, 29	GaAs	Импульсный	0,95
15, 30	InP	Импульсный	1,55

$V_{ск}$ = 5 м/мин (непрерывный Nd-YAG-лазер);

$V_{ск}$ = 0,5 м/мин (непрерывный CO_2-лазер)

3. Сопоставить полученные значения с максимальными характеристиками для промышленных технологических лазеров.

4. Рассчитать для указанного типа лазера (с учетом режима его работы):

- величину плотности мощности излучения;
- угол расходимости лазерного излучения;
- удельную поверхностную энергию;
- пиковую мощность $P_{п.}$

Таблица 3.2 – Длины волн, частота и энергия фотонов в диапазоне лазерного излучения

Диапазон	Обозначение *ISO*	Длина волны λ, нм	Частота $f \cdot 10^{14}$, Гц	Энергия *hf*, эВ
Вакуумный УФ-диапазон	UV-C	100…200	30…15	12,4…6,2
Дальний УФ-диапазон	UV-C	200…280	15…10,7	6,2…4,4
Средний УФ-диапазон	UV-B	280…315	10,7…9,5	4,4…3,9
Ближний УФ-диапазон	UV-A	315…380	9,5…7,9	3,9…3,3
Свет (видимое излучение)	VIS	380…780	7,9…3,9	3,3…1,6
Ближний ИК-диапазон	IR-A	780…1400	3,9…2,1	1,6…0,9
Ближний ИК-диапазон	IR-B	1400…3000	2,1…1,0	0,9…0,4
Средний ИК-диапазон	IR-C	3000…50000	1,0…0,06	0,4…0,025
Дальний ИК-диапазон	IR-C	50000…1000000	0,06…0,003	0,025…0,001

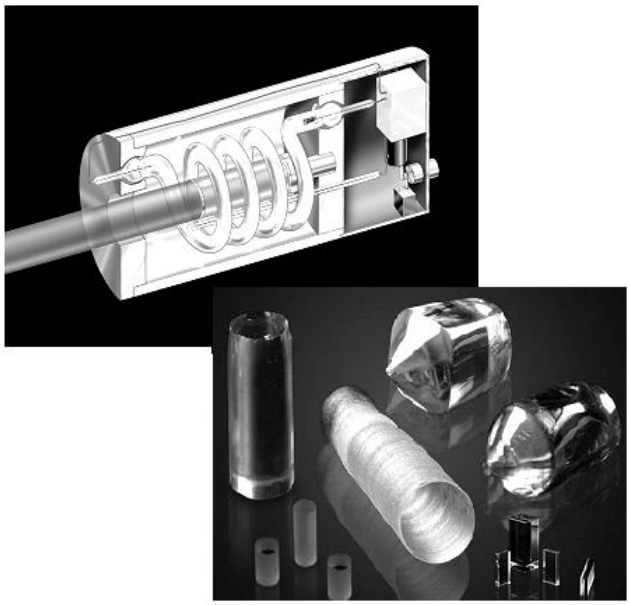
4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Технические параметры современных технологических лазеров.
3. Характеристики технологического лазера, выбранного по табл. 3.1 (исходные данные).
4. Расчет основных технических характеристик для указанного лазера.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под технологическими лазерами?
2. Каковы основные технические характеристики технологических лазеров?
3. Укажите диапазон значений основных характеристик технологических лазеров.
4. Каковы требования к диапазону длин волн генерируемого излучения при выборе лазера для обработки различных материалов?

5. Какую характеристику можно рассматривать как критерий технологических лазеров и почему?
6. Что понимают под плотностью мощности излучения?
7. От каких параметров зависит плотность мощности излучения лазера?
8. Что такое пиковая мощность?
9. Что представляет собой удельная поверхностная энергия?
10. Какие характеристики понимают под длительностью воздействия излучения в случае непрерывных и импульсных лазеров?
11. Какую роль в лазерной обработке материалов играет длительность воздействия излучения?
12. Что понимают под КПД лазера?
13. Что такое угловая расходимость луча и от чего она зависит?
14. Какие характеристики лазера наиболее важны для его оптимального выбора?
15. Укажите области применения различных типов технологических лазеров.



ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

«МАТЕРИАЛЫ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ И МЕТОДЫ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

♦ ознакомиться с материалами активных элементов твердотельных лазеров и основными требованиями, предъявляемыми к ним;

♦ изучить технологии изготовления активных элементов твердотельных лазеров;

♦ произвести расчет основных технологических параметров процесса выращивания кристаллов для активных элементов лазера по методу Чохральского.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Основные типы активных сред лазеров

Основным элементом лазера является активная среда (активный элемент).

В качестве активных сред лазеров используют твердые тела, жидкости, газы, плазменное состояние. Лазерная генерация получена на более чем 450-ти различных переходах атомов 34-х химических элементов.

Компоненты активной среды подбирают так, чтобы энергетические уровни их атомов образовывали квантовую систему, в которой есть хотя бы один метастабильный уровень, обеспечивающий инверсную населенность.

Лазеры, применяемые в различных областях науки и техники, могут быть классифицированы ***по принципу агрегатного состояния активного вещества*** на следующие группы:

- твердотельные;
- жидкостные;
- газовые;
- лазеры на свободных электронах.

В лазерах *на твердых телах* активными средами являются кристаллические или аморфные вещества, см. далее п. 2.2.

По принципу действия к твердотельным лазерам близки *жидкостные лазеры*, у которых в качестве активной среды используются жидкие диэлектрики с растворенными примесями (растворы неорганических соединений редкоземельных элементов и органических красителей).

Энергия импульса излучения твердотельных и жидкостных лазеров изменяется от десятых долей джоуля до 10^3 Дж и выше. Мощность излучения импульсных лазеров в зависимости от режима работы может изменяться от сотен киловатт до нескольких гигаватт.

Предельное значение КПД лазеров обусловливается преимущественно

внутренними потерями в кристалле активной среды и эффективностью использования энергии накачки. Так, для лазеров на рубине величина реального КПД не превышает 1 %, а для лазеров на стекле с неодимом – 2 %.

Активной средой *газовых лазеров* служит газ, смесь нескольких газов или смесь газа с парами металла. К газовым относят и химические лазеры, так как в них применяются газообразные активные среды. В химическом лазере возбуждение активной среды обеспечивается быстропротекающими химическими реакциями.

В качестве активных частиц в используют нейтральные атомы, ионы и молекулы газов.

Лазеры на нейтральных атомах позволяют генерировать излучение с длиной волны преимущественно в инфракрасной части спектра и некоторые – в красной области видимого спектра.

Ионные газовые лазеры дают в основном видимое и ультрафиолетовое излучение.

Молекулярные газовые лазеры генерируют излучение с длиной волны в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах.

Мощность лазеров на нейтральных атомах, например, гелий-неонового в непрерывном режиме, не превышает 50 мВт, ионных (аргонового) – достигает 500 Вт, молекулярные лазеры являются наиболее мощными.

Так, лазеры на углекислом газе в непрерывном режиме имеют выходную мощность до нескольких десятков киловатт.

КПД лазеров на нейтральных атомах и ионах практически не превышает 0,1 %, молекулярные имеют значительно больший КПД, достигающий 20 %.

Наиболее перспективными для использования во многих технологических процессах являются *волоконные лазеры* с использованием активных элементов на основе волоконной оптики (активная среда представляет собой стеклянную или полимерную нить диаметром от нанометров до 1000 мкм из оптически прозрачного материала).

Средняя выходная мощность подобных лазеров составляет от 2 до 50 кВт (наибольшие уровни мощности достигнуты в лазерах на Yb-активированном волокне), КПД – до 50 % .

Технические характеристики волоконных лазеров позволяют реализовать режим дистанционной обработки, существенно упрощающий встраивание лазерного оборудования в современные роботизированные производственные линии.

2.2. Материалы активной среды твердотельных лазеров и основные требования к ним

Из всех типов лазеров наиболее распространены твердотельные лазеры (ТЛ).

В лазерах *на твердых телах* активными средами являются кристаллические или аморфные вещества (стекла) в виде цилиндрических или призматических стержней, рис. 2.1, диаметром 3…10 мм, длиной 50…200 мм, легированные оптически активными веществами – переходными металлами (Cr, Ni, Co) или редкоземельными элементами (Nd, Er, Ho).

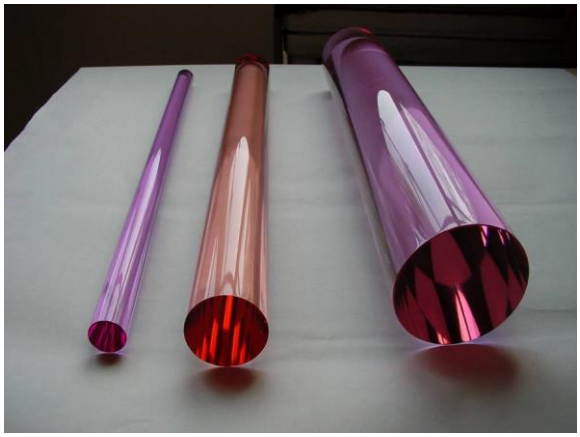


Рисунок 2.1 – Активный элемент твердотельных лазеров

Поскольку время жизни на верхних лазерных уровнях является весьма продолжительным, в твердых телах удается накопить большую оптическую энергию с выделением высокой энергии и мощности импульсов при малой их длительности.

Рабочее вещество для ТЛ – кристалл или стекло должно обладать благоприятными оптическими, механическими и термическими свойствами, в т.ч. оптической однородностью для исключения потерь света из-за рассеяния, высокой теплопроводностью, стойкостью по отношению к различным физико-химическим факторам (например, перепадам температуры и влажности) с целью сохранения стабильности структуры и свойств.

Данные материалы должны также иметь вполне определенный набор энергетических уровней, позволяющих эффективно воспринимать подводимую извне энергию и с возможно меньшими потерями преобразовывать ее в электромагнитное излучение.

Твердые лазерные материалы, кроме перечисленных свойств, должны обладать высокой прочностью и выдерживать без разрушения механическую обработку (резку, шлифовку, полировку), необходимую при изготовлении из них активных элементов.

Исходя из указанных требований, для изготовления кристаллов исполь-

зуют *оксиды и фториды*, для стекол – *фосфаты и силикаты*.

Из оксидов могут быть применены искусственный рубин (сапфир), гранаты и алюминаты.

В первых реализованных на практике лазерных системах активным веществом стал рубин – оксид Al_2O_3 (сапфир), легированный ионами хрома (Cr^{3+}). Из гранатов наиболее известны: $Y_3Al_5O_{12}$ (АИГ, *YAG* – алюмо-иттриевый гранат), $Gd_3Ga_5O_{12}$ (ГГГ, *GGG* – гадолиний-галлиевый гранат) и $Gd_3Sc_2Ga_3O_{12}$ (ГСГГ, *GSGG* – гадолиний-скандий-галлиевый гранат). Из алюминатов – $YAlO_3$, легированный Nd, Er, Mo или Tm. Из фторидов – CaF_2, $YLiF_4$, легированные разными ионами – Nd, Ho, Er.

Для легирования обычно используют переходные металлы (хром Cr, никель Ni, кобальт Co) или редкие земли (неодим Nd, эрбий Er, гольмий Ho). При легировании часть атомов основного вещества (от 10^{-4} до 10^{-1}) замещается примесными атомами (ионами). Концентрация примесных атомов – от 0,05 до нескольких процентов (по массе).

Указанные активные среды позволяют, по сравнению с другими материалами, создавать лазеры с большой выходной энергией и высоким КПД.

Диапазон работы современных твердотельных лазеров охватывает ультрафиолетовую, видимую и ближайшую инфракрасную области спектра.

Генерация подобных лазеров осуществляется преимущественно методом оптической накачки, причем энергия поглощается в основном примесными ионами.

Рассматриваемые лазерные материалы отличают высокая концентрация активных частиц (10^{19}…10^{21} см$^{-3}$), весьма небольшая ширина линии генерации (0,001…0,1 нм) и малая угловая расходимость генерируемого излучения.

К недостаткам следует отнести низкий (1…5%) коэффициент преобразования электрической энергии в энергию лазерного излучения в системе лампа накачки-кристалл, сложность изготовления лазерных стержней больших размеров и необходимой оптической однородности.

Химический состав, физико-химические свойства и длины волн генерируемого излучения лазерных (твердотельных) материалов на основе кристаллов с примесями представлены в табл. 2.1.

В отличие от кристаллов лазерные стекла имеют неупорядоченную внутреннюю структуру. Наряду со стеклообразующими компонентами SiO_2, B_2O_3, P_2O_5, BeF_2 в них содержатся Na_2O, K_2O, Li_2O, MgO, CaO, BaO, Al_2O_3, Sb_2O_3. Активными примесями служат чаще всего ионы неодима Nd^{3+}, используются также гадолиний Gd^{3+}, эрбий Er^{3+}, гольмий Ho^{3+}, иттербий Yb^{3+}. Концентрация ионов неодима Nd^{3+} в стеклах доходит до 6% (по массе).

Таблица 2.1 – Состав и свойства кристаллических материалов для создания активных элементов твердотельных лазеров

Кристалл	Активная примесь		Плотность, кг/м^3	Показатель преломления	Температура плавления, К	Твердость (по минералогической шкале)	Основные длины волн генерации, мкм
	Вещество	Содержание, % (по массе)					
Al_2O_3	Cr^{3+}	0,03…0,7	3980	1,764	2303	9	0,6943 R_1-линия 0,6929 R_2-линия
$Y_3Al_5O_{12}$	Nd^{3+}	0,5…2,5	4560	1,835	2203	8,5	1,0641 при 300 К
$CaWO_4$	Nd^{3+}	0,5…3	6066	1,926	1843	4,5…5	1,058 при 300 К
CaF_2	Dy^{2+}	0,02…0,06	3180	1,434	1639	4	2,36 при 77 К
LaF_3	Nd^{3+}	0,5…2	-	-	1766		1,0633 при 295 К 1,0631 при 77 К 1,0399 при 77 К

В стеклах (как лазерных материалах) достигается высокая концентрация активных частиц. Другим достоинством стекол является возможность изготовления активных элементов больших размеров (до 1,8 м длиной и до 70 мм диаметром) практически любой формы с высокой оптической однородностью из дешевого сырья.

Стекла варят в платиновых или керамических тиглях. Активные элементы из стекол просты в изготовлении, могут производиться массово с заданными и воспроизводимыми свойствами.

К недостаткам стекол в качестве лазерных материалов следует отнести относительно широкую полосу генерации (3…10 нм) и низкую теплопроводность, препятствующую быстрому отводу тепла при мощной оптической накачке.

Состав и физические свойства лазерных стекол с неодимом приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Состав и физические свойства лазерных стекол с неодимом (длина волны генерации 1,06 мкм)

Наименование или шифр стекла	Состав, % (по массе)	Плотность, кг/м^3	Показатель преломления
Баритовый крон	SiO_2-59, BaO-25, Sb_2O_3-1, K_2O-15 (добавки Nd_2O_3-0,13-10)	3000	1,54
0580	SiO_2-67,17, Na_2O-15,93, CaO-10,8, Nd_2O_3-4,78, Al_2O_3-0,75, Sb_2O_3 и As_2O_3-0,38, K_2O-0,19	2630	1,5337
Боратное	BaO-35, B_2O_3-45, Nd_2O_3-20	3870,4	1,65
Лантаноборосиликатное	добавка Nd_2O_3-2	4340	1,691

2.3. Методы изготовления активных элементов твердотельных лазеров

Лазерные кристаллы с дозированными примесями выращиваются, как правило, направленной кристаллизацией расплава в специальных (кристаллизационных) аппаратах, обеспечивающих высокую стабильность температуры расплава и скорости роста кристалла.

Содержание посторонних примесей в исходных веществах для выращивания кристаллов не должно превышать 0,01% по массе, а некоторых – 0,0001%.

Методы выращивания активных элементов основаны на реализации одного из двух следующих условий: 1) создания условий для роста единичного кристалла и поддержании достаточно медленной скорости его роста; 2) наличия монокристаллической затравки (кристалла, на котором начинается рост заготовки), что снимает необходимость переохлаждения для образования критического зародыша и позволяет регулировать структуру растущего кристалла.

Существует большое разнообразие методов выращивания лазерных кристаллов, наиболее совершенным и широко применяемым в промышленности является ***метод Чохральского.***

Сущность этого метода, рис. 2.2, 2.3, заключается в том, что исходный материал кристалла сначала расплавляется в специальном тугоплавком тигле. Последующая кристаллизация осуществляется путем выведения части расплава из тигля с помощью затравки (тонкого стержня диаметром несколько миллиметров).

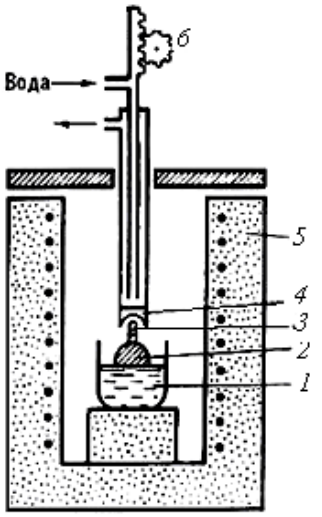


Рисунок 2.2 – Схема аппарата для выращивания лазерных кристаллов по методу Чохральского: *1* – тигель с расплавом; *2* – кристалл; *3* – затравка; *4* – холодильник; *5* – нагреватель; *6* – механизм вытягивания

После частичного оплавления торца затравки ее вместе с растущим на ней кристаллом вытягивают из расплава. Температура затравки несколько ниже температуры расплава, поэтому при вытягивании расплав постепенно

кристаллизуется на ее поверхности. В результате теплоотвода через затравку на ней начинается ориентированная кристаллизация.

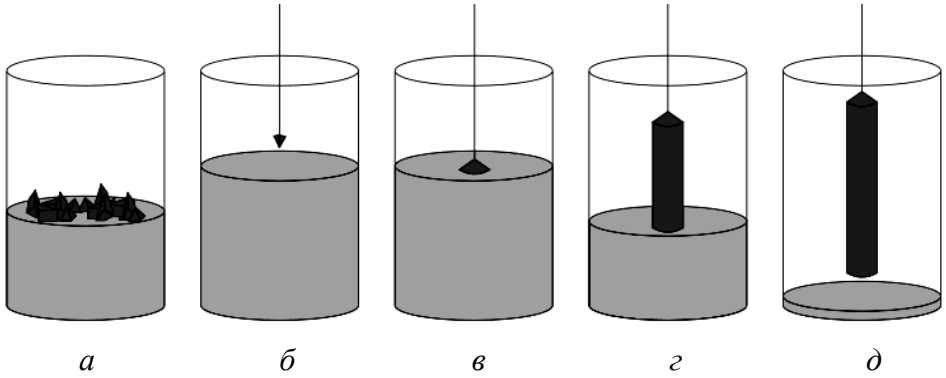


Рисунок 2.3 – Основные стадии метода Чохральского:
а – плавление основного материала, введение примесей; *б* – введение затравочного кристалла; *в* – начало кристаллизационного роста; *г* – вытягивание кристалла из расплава; *д* – сформированный кристалл

Диаметр растущего кристалла регулируется путем подбора скорости вытягивания и температуры расплава.

Одним из существенных недостатков технологии является низкая скорость роста кристаллов (~ 0,5 мм/ч). Для выращивания кристалла средних размеров (длиной около 150 мм) требуется до 300 ч непрерывной работы ростовой установки.

В процессе роста в центральной части кристаллов возникают механические напряжения, приводящие к оптическим искажениям. Поэтому активные элементы в форме цилиндрических стержней различных размеров (диаметром до 40 мм, длиной до 200 мм) для лазеров вырезают на металлорежущих высокоточных станках с помощью алмазных инструментов из периферийных областей кристалла.

Торцы стержней шлифуют, а затем полируют. В большинстве случаев стержни изготавливают с плоскими торцами, параллельными друг другу (с точностью 3…5") и строго перпендикулярными геометрической оси стержня. Возможно применение торцов сферической или другой (нестандартной) конфигурации.

Для создания лазерных кристаллов возможно применение также других методов, например, ***метода Вернейля***, рис. 2.4.

Данный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с методом Чохральского: он является бестигельным (т.е. предотвращает процессы физико-химического взаимодействия расплава с контейнером); в методе практически снята проблема появления остаточных напряжений в кристаллах; возможно увеличение размеров кристаллов и скорости их роста (до 20 мм/ч)

и т.д. К недостаткам метода относится некоторое снижение качества кристаллов по сравнению с методом Чохральского.

Методу Вернейля отдается предпочтение при выращивании *рубиновых лазерных кристаллов*.

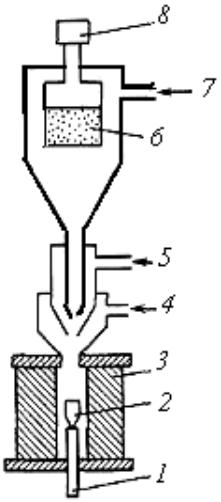


Рисунок 2.4 – Схема аппарата Вернейля: *1* – кристаллоноситель; *2* – растущий кристалл; *3* – кристаллизационная камера; *4,5* – подача кислорода; *6* –шихта; *7* – подача водорода; *8* – дозатор

Данный метод заключается в том, что исходная шихта (например, порошок окиси алюминия и окиси хрома при выращивании рубиновых кристаллов) из бункера с помощью дозатора попадает в водородно-кислородное пламя горелки, где расплавляется и далее стекает на стержень-кристаллоноситель, формируя шарик расплава.

Стержень опускается со скоростью, соответствующей скорости роста кристалла, что обеспечивает постоянное нахождение расплавленной растущей части кристалла в пламени.

На рис. 2.5 приведены лазерные кристаллы, выращенные различными методами, и полученные из них в результате механической обработки активные элементы.

Рисунок 2.5 – Лазерные кристаллы и
и изготовленные из них активные элементы

2.4. Особенности формирования лазерного излучения в твердотельных лазерах на рубине и алюмоиттриевом гранате

2.4.1. Лазер на рубине

Рубин (от лат. *rubenus* и позднелат. *rubinus* – красный) известен сотни лет как драгоценный камень; является разновидностью минерала корунда (Al_2O_3), содержит примеси ионов хрома Cr^{3+} (от сотых долей до 2 %), которые замещают ионы алюминия Al^{3+}.

В лазерной технике обычно используют бледно-розовый рубин с содержанием хрома 0,03…0,7 %, см. табл. 2.1 (чаще всего к Al_2O_3 добавляется 0,05 весовых % Cr_2O_3).

Рубиновые кристаллы имеют стержневую форму диаметром 3…20 мм и длину до 300 мм. Кристаллы оптически хорошего качества относительно легко изготавливать, они имеют высокую механическую прочность и теплопроводность, см. табл. 2.3, что облегчает охлаждение кристалла.

Энергетические диаграммы квантовых уровней и переходов, поясняющие действие рубинового лазера в первом приближении представлены на рис. 2.6.

Исходным является уровень относительно небольшой энергии E_1 (основное состояние). При освещении рубина источником света (поглощении) ионы хрома Cr^{3+} переходят с базового уровня E_1 на возбужденный уровень E_3.

Далее через промежуток времени $\tau \approx 10^{-8}$ с ионы хрома Cr^{3+} без излучения (с передачей избытка энергии колебаниям кристаллической решетки) переходят на уровень E_2, где создается высокая концентрация микрочастиц (инверсия населенностей) по сравнению с основным уровнем E_1.

Уровень E_2 – метастабильный. Переход между уровнями E_3 и E_2 безызлучательный. Перенаселенность возбужденного уровня E_2 по сравнению с невозбужденным уровнем E_1 возникает из-за относительно большого времени жизни уровня E_2 ($\tau \approx 10^{-3}$ с).

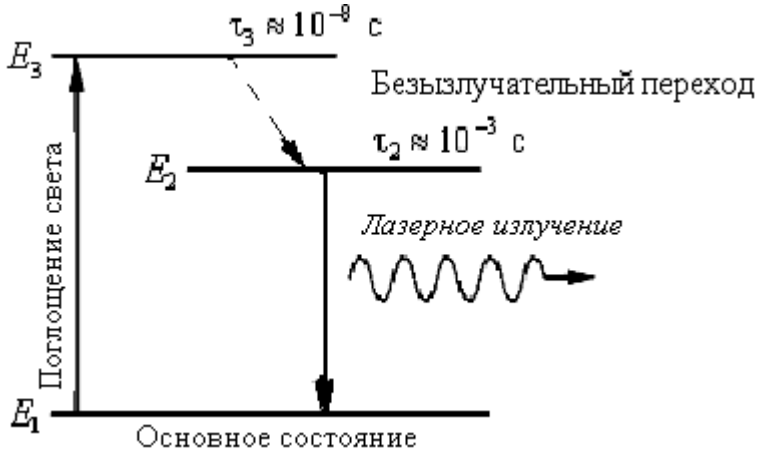


Рисунок 2.6 – Энергетические уровни и переходы в рубиновом лазере

Плотность лазерных частиц N при оптимальном легировании 0,05 % весовых Cr_2O_3 для данного типа лазеров составляет ~$1{,}6 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$.

В дальнейшем ионы хрома возвращаются на основной уровень E_1, обеспечивая энергетический переход $E_2 \rightarrow E_1$ и лазерное излучение в красной области спектра. Длина волны лазерных колебаний рубина составляет $\lambda = =$ 0,6943 мкм (R_1 – уровень) и λ = 0,6929 мкм (R_2 – уровень), см. табл. 2.1. Линия R_1 достигает порога генерации лазера раньше, так что обычно только она и возбуждается.

Поскольку нижний лазерный уровень E_1 является основным энергетическим уровнем, *рубиновый лазер относится* к *трехуровневым системам.*

Рубиновый лазер может работать в непрерывном и импульсном режимах работы. Параметры различных режимов импульсной генерации лазерного излучения приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Различные режимы работы рубинового лазера с типовыми характеристиками излучения

Режим генерации	Длительность импульсов	Импульсная мощность	Энергия в импульсе
- стандартный импульсный	0,5 мс	100 кВт	50 Дж
- с модуляцией добротности	10 нс	100 МВт	1 Дж
- с синхронизацией мод	20 пс	5 ГВт	0,1 Дж

Лазеры на рубине являются одними из самых мощных импульсных лазеров; применяются в спектроскопии, в медицине, в обработке материалов.

2.4.2. Лазер на алюмоиттриевом гранате (АИГ)

Применение гранатов в современной квантовой электронике объясняется удачным сочетанием оптических, теплофизических и механических свойств. Наибольшее распространение получил алюмоиттриевый гранат $Y_3Al_5O_{12}$, легированный неодимом (Nd^{3+}).

Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом относятся к важнейшему классу лазеров, предназначенных для использования в науке и технике, особенно в измерительной, а также при обработке материалов, в медицине, спектроскопии и голографии.

Наиболее часто алюмоиттриевый гранат легируют неодимом в концентрации 0,5…2,5 %, см. табл. 2.1.

Чистый ***алюмоиттриевый гранат*** – бесцветный, оптически изотропный кристалл с кубической решеткой. Элементарная ячейка содержит восемь молекул $Y_3Al_5O_{12}$. В результате легирования в расплаве с Nd_2O_3 примерно 1 % ионов Y^{3+} замещается ионами Nd^{3+} с достижением плотности ионов неодима $1{,}4 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$.

Вследствие существенного различия в ионных радиусах иттрия и неодима (~ 3%) при легировании происходит искажение кристаллической решетки и появление оптической неоднородности. Для достижения более однородного распределения легирующего элемента в кристалле и уменьшения внутренних напряжений применяют малые скорости роста кристаллов (~1 мм/час). Кроме того, синтезированные кристаллы подвергают длительному отжигу при температуре 1500 °С.

Кристаллы алюмоиттриевого граната применяются в виде стержней диаметром 3…8 мм и длиной 30…100 мм.

Лазеры на основе алюмоиттриевого граната могут работать в режиме непрерывной генерации с выходной мощностью, равной нескольким сотням ватт; в частотном режиме с частотой повторения импульсов от единиц герц до мегагерц и в режиме единичных импульсов с импульсной мощностью, равной десяткам мегаватт.

Для большей части применяемых на практике лазеров подобного типа характерно излучение с длиной волны λ = 10641 нм (1,0641 мкм), см. табл. 2.1.

Энергетические уровни неодима Nd^{3+} в АИГ-лазере показаны на рис. 2.7.

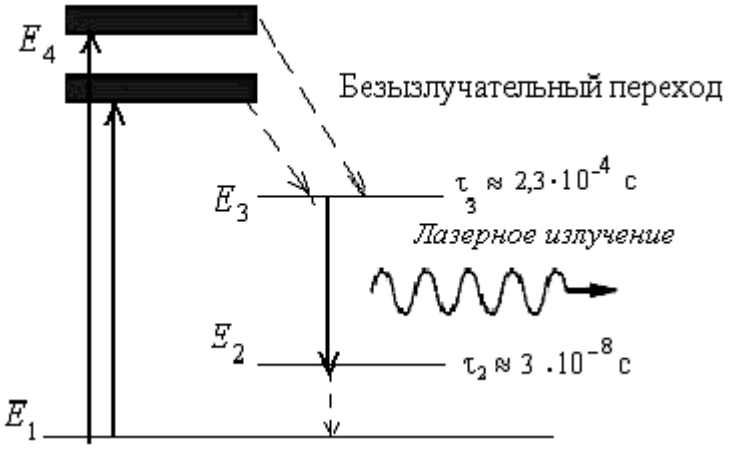


Рисунок 2.7 – Энергетические уровни неодима Nd^{3+} в ИАГ-лазере

АИГ является твердым кристаллом с высокими оптическими качествами. Оптическая накачка осуществляется ксеноновыми (при мощности накачки ~10 Вт) и криптоновыми лампами (при мощности накачки ~100 Вт).

Такая накачка обеспечивает переход ионов неодима с исходного энергетического уровня E_1 на различные уровни высокой энергии (E_4), см. рис. 2.7.

Далее возбужденные частицы без излучения энергии переходят на уровень E_3.

Лазерный переход возбужденных частиц происходит между энергетическими уровнями E_3 и E_2 с длиной волны излучения λ = 1,0641 мкм (наиболее интенсивная линия), см. табл. 2.1. Уровень E_2 в такой системе расположен существенно выше основного состояния E_1. Таким образом, *АИГ-лазер является четырехуровневой квантовой системой,* см. рис. 2.7.

К недостаткам алюмоиттриевого граната относится низкий коэффициент вхождения ионов неодима, что затрудняет получение кристаллов больших размеров с равномерным распределением неодима. Поэтому проводится поиск других сред со структурой граната.

Одним из наиболее перспективных материалов является галлиевый гранат, а также редкоземельные галлиевые гранаты.

Редкоземельные галлиевые гранаты имеют меньшую температуру плавления, следовательно, более технологичны. Больший параметр решетки обеспечивает равномерное введение неодима. Близость радиусов ионов галлия и хрома делает возмозможным легирование их хромом. Последнее обстоятельство особенно важно, поскольку позволяет осуществлять перенастраиваемую генерацию на электронно-колебательных переходах хрома при *комнатной температуре*.

3. ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с основными материалами, применяемыми для изготовления активных элементов твердотельных лазеров.

2. Ознакомиться с устройством, принципом работы и технологическими параметрами установок для выращивания лазерных кристаллов методом Чохральского, а также методом направленной горизонтальной кристаллизации (на базе оборудования отдела сегнетоэлектрических и лазерных монокристаллов Института монокристаллов НАН Украины).

3. Произвести расчет некоторых параметров выращивания кристаллов для активных элементов лазера по методу Чохральского:

♦ Рассчитать скорость роста кристалла V, м/с:

$$V = 10^{-6} \frac{Tk}{\rho \lambda D}, \qquad (3.1)$$

где T – температура расплава, K; k – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ρ – плотность материала, кг/м^3; λ – удельная теплота плавления, Дж/кг; D – диаметр кристалла, м.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.1, а также в табл. 2.1.

♦ Рассчитать время t, час, необходимое для выращивания кристалла заданной длины.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета параметров выращивания кристаллов для активных элементов лазера по методу Чохральского

№ варианта	Материал активного элемента	Удельная теплота плавления λ, кДж/кг	Коэффициент теплопроводности k, Вт/(м·К)	Диаметр активного элемента D, мм	Длина активного элемента L, мм
1,16	$Cr:Al_2O_3$	390	38,5	2,5	130
2,17	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$	280	25,5	2,8	144
3,18	$Cr:Al_2O_3$	390	38,5	4,2	156
4,19	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$	280	25,5	4,5	148
5,20	$Cr:Al_2O_3$	390	38,5	2,7	189
6,21	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$	280	25,5	3,9	100
7,22	$Cr:Al_2O_3$	390	38,5	4,3	114
8,23	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$	280	25,5	5,6	127
9,24	$Cr:Al_2O_3$	390	38,5	7,5	164
10,25	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$	280	25,5	5,9	158
11,26	$Cr:Al_2O_3$	390	38,5	8,2	170
12,27	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$	280	25,5	10,0	228
13,28	$Cr:Al_2O_3$	390	38,5	1,7	125
14,29	$Nd:Y_3Al_5O_{12}$	280	25,5	2,4	154
15,30	$Cr:Al_2O_3$	390	38,5	3,5	168

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.

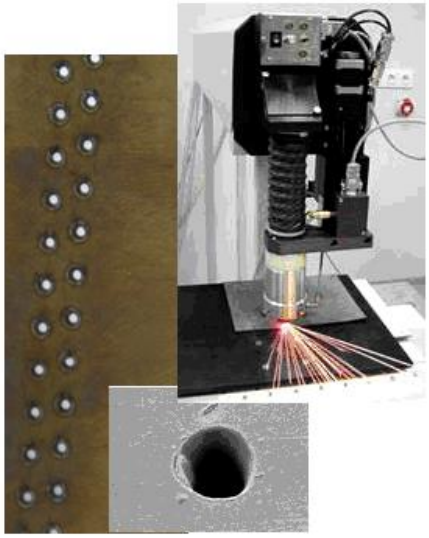
2. Основные требования к материалам активных элементов твердотельных лазеров и технология их изготовления.

3. Сущность метода Чохральского и его схема.

4. Расчет основных параметров выращивания кристаллов для активных элементов лазера.

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляются к активной среде лазеров?
2. Какие вещества применяют для изготовления активного элемента твердотельных лазеров?
3. Какие элементы используют для легирования активной среды твердотельных лазеров, как осуществляется их выбор?
4. Укажите наиболее распространенные кристаллические материалы активных элементов твердотельных лазеров. Каковы длины волн генерируемого излучения?
5. Укажите наиболее распространенные материалы активных элементов (на стекле) твердотельных лазеров. Каковы длины волн генерируемого излучения?
6. В чем особенности изготовления лазерных стекольных активных элементов? Каковы их геометрические параметры и в чем преимущество по сравнению с кристаллическими?
7. Каковы геометрические параметры кристаллических активных элементов в твердотельных лазерах?
8. Назовите основные методы изготовления кристаллических активных элементов лазеров.
9. В чем сущность метода Чохральского и для выращивания каких лазерных кристаллов он применим?
10. Каковы особенности метода Вернейля?
11. Укажите основные характеристики рубиновых активных элементов.
12. Объясните сущность энергетических переходов в рубиновом лазере.
13. Каковы основные параметры режима работы рубинового лазера?
14. Укажите основные характеристики активных элементов из алюмоиттриевого граната.
15. Каковы основные параметры режима работы лазера на алюмоиттриевом гранате?



ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

«ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ, КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

♦ ознакомиться с особенностями процесса получения отверстий с помощью лазерного излучения;

♦ ознакомиться с оборудованием, применяемым для лазерной прошивки отверстий, техническими характеристиками установки «Квант-12»;

♦ изучить методику определения показателей качества, точности и производительности лазерной прошивки отверстий.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Лазерная обработка материалов имеет широкое промышленное применение, особенно для обработки твердых, жаропрочных материалов, а также для материалов, имеющих тенденцию к хрупкому разрушению.

Первым и наиболее распространенным технологическим применением лазерного излучения является лазерная прошивка отверстий.

По сравнению с механической обработкой данная операция имеет ряд преимуществ:

♦ возможно получение отверстий в любых материалах независимо от их механических свойств;

♦ возможно получение отверстий малых диаметров (от нескольких микрометров до 0,3…0,5 мм) с большим отношением глубины к диаметру (10…25);

♦ возможно получение отверстий с осью, направленной под углом к поверхности.

Лазерная прошивка отверстий нашла широкое применение при изготовлении фильер, форсунок, сопел и устройств для контролируемого напуска газов; диафрагм для оптических устройств; каналов охлаждения компонентов турбинных двигателей (одна из наиболее характерных операций лазерной обработки); при обработке алмазов, камней (например, рубинов) в часовой промышленности, гравировании изделий, в гироскопических устройствах, при балансировке роторов высокоскоростных двигателей и т.д.

2.1. Размерные характеристики отверстий

Наиболее важными размерными характеристиками отверстий являются глубина h и диаметр d, рис. 2.1.

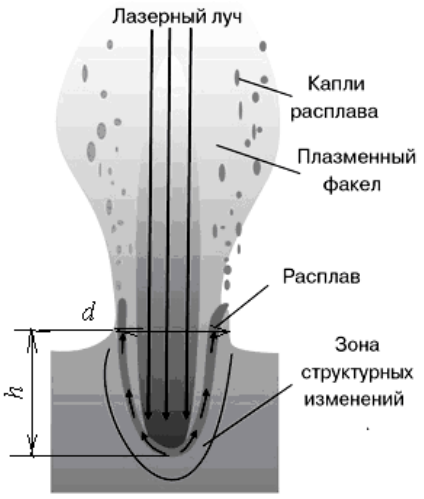


Рисунок 2.1 – Схема лазерной прошивки отверстия

Управляемыми параметрами процесса лазерной обработки отверстий являются: энергия излучения в импульсе *E,* длительность импульса τ, фокусное расстояние фокусирующей системы *F*, смещение поверхности детали относительно фокальной плоскости фокусирующей системы *ΔF*, количество импульсов *n*. Эти параметры на современном технологическом оборудовании могут изменяться в довольно широких пределах и, соответственно, обеспечивать достаточно большой диапазон глубин получаемых отверстий *h* и диаметров *d.*

Так, с увеличением *энергии излучения* в импульсе растут как диаметр, так и глубина отверстий (лунки), причем и диаметр, и глубина зависят от энергии излучения нелинейно.

Увеличение *фокусного расстояния* при заданных *E* и τ приводит к уменьшению плотности мощности лазерного излучения, что вызывает уменьшение глубины входного диаметра отверстия.

К изменению плотности мощности излучения приводит изменение *длительности импульса* τ (при постоянной энергии). При воздействии на материал импульсов различной длительности характер разрушения поверхности неодинаков.

Так, при коротких импульсах в результате более высокой плотности мощности растет температурный градиент, что приводит к возрастанию доли испаренного материала в продуктах лазерной эрозии.

В случае действия длинных световых импульсов картина разрушения несколько отлична. В продуктах выброса преобладает расплавленный материал, который в виде значительного кратера остается у края отверстия.

Существуют различные подходы к определению диаметра и глубины отверстий.

В общем случае при прошивке отверстия лазером с заданной длительностью импульса глубина отверстия h и его диаметр d могут быть определены из следующих соотношений:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r}{\mathrm{tg}\left(\phi/2\right)}\right)^3 + \frac{3E}{\pi\,\mathrm{tg}^2\left(\phi/2\right) L_и \rho}} - \frac{r}{\mathrm{tg}\left(\phi/2\right)}, \qquad (2.1)$$

$$d = 2\sqrt[3]{r^3 + \frac{3E\,\mathrm{tg}\left(\phi/2\right)}{\pi L_п \rho}}, \qquad (2.2)$$

где r – радиус пятна фокусировки; $\phi/2$ – половина угла светового конуса излучения; E – энергия излучения в импульсе; $L_и$ – скрытая теплота испарения вещества (количество тепла, которое нужно сообщить жидкому или твердому телу для превращения его в пар при неизменной температуре); $L_п$ – скрытая теплота плавления вещества (количество тепла, которое нужно сообщить твердому веществу для перевода в жидкое состояние при неизменной температуре); ρ – плотность материала.

Приближенная оценка размерных характеристик отверстий, полученных с помощью лазерного излучения, может быть выполнена с помощью соотношений:

$$h \approx \sqrt[3]{\frac{E}{\mathrm{tg}^2\left(\phi/2\right) L_и \rho}}, \qquad (2.3)$$

$$d \approx 2\sqrt[3]{\frac{E\,\mathrm{tg}\left(\phi/2\right)}{L_п \rho}}. \qquad (2.4)$$

2.2. Качество поверхности отверстий

Область применения лазерной технологии на прошивочных операциях ограничивается в настоящее время отверстиями, предназначенными в основном не для сопряжения с другими деталями, а для пропускания лучей (световых, электронных), различных жидких или газообразных сред (топлива, воды, воздуха и т. д.). В связи с этим *жесткие требования предъявляются обычно не столько к качеству обработанной поверхности, сколько к точности размерных характеристик отверстия.* Тем не менее для ряда технических применений данной технологии представляет также интерес оценка макро- и микрогеометрии поверхности отверстия, влияния различных факторов на шероховатость обработанной поверхности.

Микрорельеф обработанной поверхности *определяется в основном гидродинамическими процессами, имеющими место при взаимодействии лазерного излучения с материалами.*

В частности, *в углеродистых сталях с увеличением содержания углерода наблюдается тенденция к снижению шероховатости поверхности отверстий, получаемых лазерной обработкой,* рис. 2.2.

Данный факт объясняется следующим образом. Микрорельеф поверхности отверстия при лазерной обработке формируется расплавленным металлом, вязкость которого играет важную роль в формировании поверхностного слоя.

Под вязкостью (внутренним трением) жидкостей (газов) понимают свойство, характеризующее сопротивление действию внешних сил, вызывающих их течение.

Для углеродистых сталей вязкость расплава уменьшается с увеличением содержания углерода. В связи с этим для сталей с повышенным содержанием углерода при лазерной обработке из-за низкой вязкости расплава создаются благоприятные условия для его удаления из полости отверстия. И, наоборот, условия эвакуации ухудшаются для малоуглеродистых сталей.

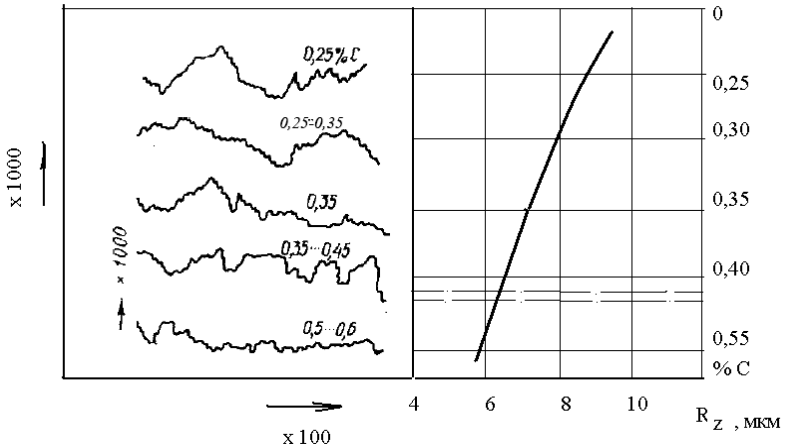


Рисунок 2.2 – Влияние содержания углерода на шероховатость поверхности отверстий, полученных с помощью лазерного излучения в углеродистых сталях

При определении влияния режимов обработки на шероховатость поверхности наиболее важными являются три фактора: энергия излучения E, длительность импульса τ и количество импульсов n.

Общая зависимость для определения высоты микронеровностей R_z, мкм, ***при обработке лучом лазера*** имеет вид

$$R_z = cE^x \tau^{-y} n^z, \qquad (2.5)$$

где c – коэффициент, характеризующий свойства обрабатываемого материала (зависит от обрабатываемости лазерным излучением); E – энергия в импульсе, Дж; τ – длительность импульса, мс; n – количество импульсов;

x,y,z – показатели степени (различны для разных материалов, определяются экспериментально, зависят от условий обработки и материала).

Из приведенной зависимости видно, что *при увеличении энергии излучения или при уменьшении длительности импульса высота микронеровностей поверхности увеличивается.*

На образцах из стали Х18Н9Т шероховатость поверхности отверстий, полученных при E = 10 Дж, τ = 1,3 мс, F = 40 мм и n = 1, по ГОСТ 2789-73 находится в пределах R_z = 1,5...2 мкм.

При рассмотрении влияния различных факторов на микрорельеф поверхности нужно учитывать случайные отклонения от геометрического профиля отверстия, вызванные различными посторонними включениями, загрязнениями, пористостью материала и т.д. При изучении микрошлифов продольного сечения отверстий в ряде случаев довольно отчетливо обнаруживаются микрораковины, возникшие в поверхностном слое обработанного лазерным излучением материала.

Качество поверхности обработанных отверстий характеризуется не только шероховатостью, но и размерами дефектного слоя.

Дефектным слоем считается приграничный к полости отверстия слой со свойствами, отличными от исходного материала, см. рис. 2.1. Этот слой представляет собой зону термического влияния и для большинства металлических сплавов имеет повышенную твердость (в 1,2... 1,5 раза выше твердости исходного материала). Глубина этого слоя невелика – обычно 10...45 мкм для типовых длительностей импульса. Для многих применений наличие такого упрочненного слоя можно рассматривать как положительный фактор (например, в отверстиях опорных подшипников скольжения, в сопловых отверстиях и т.д.). Если же изменение свойств приграничного с отверстием слоя нежелательно, то величина припуска под доводочную операцию определяется толщиной дефектного слоя.

2.3. Точность лазерной обработки отверстий

Диапазон диаметров отверстий, получаемых на современных лазерных технологических установках, обычно составляет от нескольких микрометров до 0,3…0,5 мм. Для этого диапазона диаметральных размеров поле рассеяния лежит в пределах от 5...12 до 35...60 мкм в зависимости от диаметра отверстия. На рис. 2.3 показана эмпирическая кривая распределения средних диаметров отверстий ($D_{ном}$ = 0,06 мм).

Оценка отклонений размеров отверстий показывает, что отверстия, обработанные в моноимпульсном режиме без применения специальных

приемов, можно отнести к 6…7 квалитетам в зависимости от условий обработки. С учетом отклонений формы точность полученных отверстий может быть ниже.

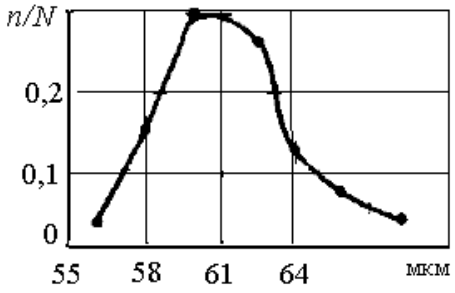


Рисунок 2.3 – Полигон распределения средних диаметров отверстий (материал – БрКМц3-1, режим обработки: E = 1,6 Дж, F = 43 мм, τ = 1,5 мс, h = 200 мкм, t = 60 с)

Сравнительно невысокая точность обработки находится в определенном противоречии с высокой производительностью процесса, с другими важными достоинствами лазерной обработки.

Поэтому проблема повышения точности лазерной обработки материалов играет первостепенную роль.

На точность процесса лазерной обработки влияет большое количество факторов, в т.ч. погрешности технологического процесса, погрешности оборудования, а также свойства обрабатываемого материала.

2.4. Производительность обработки

Данный технологический параметр процесса можно трактовать двояко. С одной стороны, его можно рассматривать как удельную эрозию материала (объем материала, удаляемый в единицу времени). С другой стороны, под производительностью можно понимать количество отверстий необходимых размеров и точности, прошитых в единицу времени.

Объемный показатель производительности П (минутная производительность, см^3/мин) обычно рассматривают применительно к одному отверстию (полости):

$$П = \frac{n\,E\,f}{L\acute{y}}\ , \qquad (2.6)$$

где n – количество лазерных импульсов, необходимых для прошивки единичного отверстия; E – энергия излучения в импульсе; f – частота подачи импульсов; $L_э$ – удельная энергия разрушения данного материала, табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Значения удельной энергии разрушения материалов

Материал	$L_э$, кДж/см^3	Материал	$L_э$, кДж/см^3
Твердые сплавы		*Металлы*	
Т30К4	270	Fe	100
ТН20	240	Ti	45
ВК2	170	Al	20
ВК6	160	Nb	80
ВК20	140	W	100
Карбиды		Mo	138
TiC	250	Cu	70
WC	150	Zn	39
		Ni	64
		Pb	14
		Cr	16

Например, при обработке твердого сплава ВК6 лазерными импульсами (n = 6) с энергией E = 20 Дж и частотой f = 10 Гц минутная производительность составляет 0,45 см^3/мин. При прошивке отверстий в алюминии с лазерным излучением с теми же параметрами расчетная производительность будет выше – 3,6 см^3/мин.

Показатель штучной производительности $\boldsymbol{П_{шт}}$ (количество отверстий, прошитых в единицу времени) используется при оценке возможностей обработки серии отверстий в детали. В этом случае производительность зависит как от частоты подачи импульсов и количества импульсов, необходимых для прошивки одного отверстия, так и от времени, связанного с относительным перемещением луча или заготовки после прошивки очередного отверстия.

В общем случае выражение для оценки штучной производительности $П_{шт}$ имеет вид

$$П_{шт} = \frac{N}{nT + t_п} \ , \qquad (2.7)$$

где T – период следования импульсов; n – количество импульсов, необходимых для прошивки единичного отверстия; $t_п$ – время перемещения луча или заготовки после прошивки очередного отверстия; N – количество лучевых каналов в технологической установке (обычно N = 1).

В случае одноимпульсной прошивки отверстий машинное время обработки определяется длительностью импульса (обычно менее 1 мс). Это время на два порядка меньше времени перемещения заготовки, например, при механической инерционной загрузочной системе (≈ 0,5...0,8 с). Поэтому первым слагаемым в знаменателе можно пренебречь. Тогда производительность может достигать 2 отв/с.

При многоимпульсной обработке на оборудовании с механическим перемещением заготовки роль первого слагаемого знаменателя возрастает, если nT соизмеримо с t_n. Это будет иметь место при малой частоте подачи импульсов и значительном их количестве, необходимом для прошивки единичного отверстия. Так, при $f = 40$ Гц и $n = 20$ производительность составит 1 отв/с.

На технологическом оборудовании с безынерционным сканированием излучения t_n может быть уменьшено до сотых и тысячных долей секунды. Тогда определяющую роль в расчете штучной производительности будет играть слагаемое nT.

При частоте следования импульсов до 100...500 Гц расчетная производительность может составить от нескольких десятков до нескольких сотен отверстий в секунду.

Увеличение производительности может быть также достигнуто использованием нескольких световых каналов в технологическом оборудовании (при N>1).

2.5. Оборудование, применяемое для лазерной прошивки отверстий

В связи с тем что лазерное излучение для прошивки отверстий применяется практически с начала появления самих лазеров, ***оборудование для этого типа операций получило наибольшее развитие и распространение.***

Процесс совершенствования лазерного оборудования для прошивки идет по пути создания серийных универсальных установок, разработки специализированных вариантов серийных установок и специального оборудования.

Для данной технологии применяют CO_2-лазеры (λ = 10,6 мкм), лазеры с активной средой на гранате (λ = 1,06 мкм), рубине (λ = 0,6943 мкм).

Реализуются преимущественно импульсные режимы обработки.

2.6. Технические характеристики установки «Квант-12»

Лазерная технологическая установка «Квант-12», используемая в данной работе, является многофункциональной и предназначена для прошивки (перфорации) отверстий, сварки однородных и разнородных металлов и сплавов малых толщин, резки.

Обработке могут подвергаться различные металлы и их сплавы (в том числе высоколегированные), керамические и полупроводниковые материалы.

Некоторые технические характеристики данной установки приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Технические данные лазерной технологической установки «Квант-12»

Активный элемент из алюмоиттриевого граната, мм	6,3×100
Длина волны излучения, мкм	1,06
Режим генерации	импульсный
Средняя мощность излучения, Вт	30
Длительность импульса, мс	1,5; 2; 2,5; 4; 5
Энергия импульса излучения, Дж	0,1…10
Частота повторения импульсов, Гц	0,1…35
Скорость перфорации отверстий в материале толщиной до 2 мм, отв/с	20
Максимальная толщина стенки для прошивки отверстий, мм	15...20
Максимальная толщина реза, мм	5…6
Ширина реза, мм	0,2…0,4
Максимальная скорость сварки, мм/мин	точечной – 150…350; шовной – 600
Максимальная глубина проплавления, мм	2…3
Напряжение питания, В	200/380
Потребляемая мощность, кВт	6
Габариты, мм	1000x950x1230
Масса, кг	350

3. ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с устройством и принципом работы установки «Квант-12» с лазером на алюмоиттриевом гранате.

2. Задать требуемые параметры режима и произвести прошивку отверстия в углеродистой стали толщиной 5 мм.

3. Произвести замер диаметра полученного отверстия, проанализировать качество поверхности с помощью металлографического микроскопа МИМ-7.

4. Рассчитать основные размерные показатели отверстий, полученных с помощью лазерного излучения при различных режимах работы установки «Квант-12», характеристики их точности, качества, а также производительности.

♦ В соответствии с формулами (2.3) и (2.4), а также исходными данными, приведенными в табл. 3.1, рассчитать основные размерные параметры отверстий, полученных лазерным воздействием, – глубину h, мм, и диаметр d, мкм.

♦ Используя необходимые данные, приведенные в табл. 3.2, 3.1, с помощью формулы (2.5) произвести оценку параметра шероховатости поверхности отверстия R_z, мкм, полученного в материале с помощью лазерного излучения.

♦ В соответствии с формулой (2.6) рассчитать объемный показатель производительности $П$ (минутную производительность, см^3/мин). Исходные данные приведены в табл. 2.1, 3.1.

♦ По формуле (2.7) рассчитать штучную производительность $П_{шп}$, отв/с, приняв количество лучевых каналов в технологической установке $N = 1$; $T = 1/f$; значения времени перемещения $t_п$ луча или заготовки после прошивки очередного отверстия приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета основных технологических показателей отверстий, полученных с помощью лазерного излучения

№ варианта	Обрабатываемый материал	Скрытая теплота плавления вещества $L_п$, Дж/кг·10^3	Скрытая теплота испарения вещества $L_и$, Дж/кг·10^6	Плотность материала ρ, кг/м^3·10^3	Радиус пятна фокусировки лазерного излучения r, мкм	Угол светового конуса луча лазера, мрад	Энергия излучения в импульсе E, Дж	Длительность импульса τ, мс	Частота следования импульсов f, Гц	Количество импульсов n
1,16	Алюминий	372	10,53	2,7	100	7	1,5	1,5	10	6
2,17	Алюминий	—"—	—"—	—"—	150	9	2,0	4,5	35	8
3,18	Вольфрам	183	4,48	19,3	200	4	1,0	2,0	20	10
4,19	Железо	260	6,12	7,8	100	7	1,5	2,0	1,0	12
5,20	Железо	—"—	—"—	—"—	150	5	2,0	5,0	35	8
6,21	Медь	204	4,82	8,9	150	8	0,5	1,5	1,5	9
7,22	Медь	—"—	—"—	—"—	200	6	0,6	2,0	20	6
8,23	Никель	296	5,83	8,9	150	12	6,0	2,5	10	8
9,24	Никель	—"—	—"—	—"—	200	10	5,0	4,5	30	7
10,25	Свинец	24	0,86	11,3	100	4	0,1	2,0	10	3
11,26	Хром	128	0,66	7,2	100	15	0,4	1,5	10	4
12,27	Хром	—"—	—"—	—"—	200	17	0,5	5,0	20	5
13,28	Молибден	200	0,59	10,2	100	6	0,3	2,0	0,1	9
14,29	Молибден	—"—	—"—	—"—	200	5	0,5	4,0	3	7
15,30	Титан	360	8,97	4,5	150	20	4,0	5,0	15	7

Таблица 3.2 – Исходные данные для оценки параметра шероховатости поверхности отверстия R_z

№ варианта	Обрабатываемый материал	Обрабатываемость лазерным излучением	*c*	*x*	*y*	*z*
1,2,16,17	Al	4,57	10,3	1,3	0,78	0,24
3,18	W	1	18,4	1,8	0,97	0,27
4,5,19,20	Fe	0,9	19,2	1,9	0,98	0,28
6,7,21,22	Cu	1,43	16,1	1,7	0,95	0,25
8,9,23,24	Ni	2,35	14,5	1,4	0,88	0,26
10,25	Pb	35,8	4,6	1,2	0,58	0,20
11,12,26,27	Cr	23,3	5,8	1,3	0,66	0,22
13,14,28,29	Mo	1,25	15,4	1,7	0,96	0,26
15,30	Ti	3,50	12,3	1,5	0,85	0,23

Таблица 3.3 – Значения времени перемещения луча или заготовки после прошивки очередного отверстия

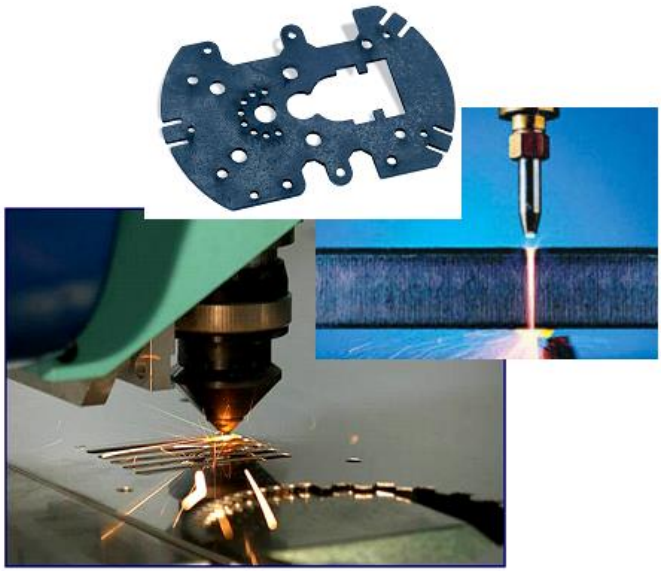
№ варианта	Время перемещения луча или заготовки после прошивки очередного отверстия $t_п$, с
1,16	0,45
2,17	0,48
3,18	0,50
4,19	0,52
5,20	0,54
6,21	0,56
7,22	0,59
8,23	0,62
9,24	0,64
10,25	0,66
11,26	0,69
12,27	0,71
13,28	0,73
14,29	0,76
15,30	0,80

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Технические характеристики лазерной установки «Квант-12».
3. Основные показатели точности, качества и производительности лазерной прошивки отверстий и их зависимость от свойств материала и параметров режима обработки.
4. Расчет основных размерных характеристик отверстий, полученных лазерной прошивкой, шероховатости их поверхности, минутной и штучной производительности.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. В чем основные преимущества лазерной прошивки отверстий по сравнению с механической обработкой?
2. Каковы области применения лазерной прошивки отверстий?
3. Какие типы лазеров применяют для лазерной прошивки отверстий?
4. От каких параметров лазерного излучения зависят размерные характеристики отверстий?
5. Какие факторы влияют на качество поверхности отверстий в стали?
6. Что понимают под дефектным слоем обработанного лазерным излучением отверстия?
7. Какие параметры входят в общую зависимость для определения высоты микронеровностей поверхности отверстия при обработке лучом лазера?
8. Почему основные требования при лазерной прошивке отверстий предъявляют не к качеству поверхности, а к точности?
9. Каковы источники погрешности при лазерной прошивке отверстий?
10. Каковы основные характеристики производительности лазерной прошивки отверстий и какими факторами они определяются?



ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

«ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ И МЕТОДИКА ИХ РАСЧЕТА»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

♦ ознакомиться с основными технологическими параметрами лазерной резки и методикой их определения;

♦ ознакомиться с оборудованием, применяемым для лазерной резки материалов;

♦ рассчитать скорость лазерной резки и стоимость деталей, полученных с помощью лазерной резки.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Особенности лазерной резки

Одним из основных процессов получения заготовок в машиностроении является резка металла.

Традиционно применяют механические способы с использованием станков общего и специального назначения для раскроя листовых, профильных и других заготовок из различных металлов и сплавов.

Перспективной технологией, которая уже достаточно широко применяется в производстве, является ***лазерная резка****, к основным достоинствам которой относят следующие.*

♦ Лазерное излучение, обеспечивая высокую концентрацию энергии, позволяет разделять обширный класс материалов – практически любые металлы и сплавы независимо от их механических свойств, неметаллические материалы.

♦ Благодаря точной фокусировке лазерного луча возможно получать узкие разрезы с минимальной зоной термического влияния.

♦ При лазерной резке не требуется механическое воздействие на обрабатываемый металл, а возникающие деформации, как временные в процессе резки, так и остаточные после полного остывания, незначительны. Это позволяет осуществлять лазерную резку с высокой степенью точности.

♦ Минимальны отходы металла, возможна реализация безотходного производства.

♦ Благодаря большой плотности мощности лазерного излучения обеспечивается высокая производительность, сочетающаяся с высоким качеством поверхности реза.

♦ Одним из основных преимуществ лазерной резки является ее автоматизация и компьютеризация, возможность перехода с одного типа деталей любой геометрической сложности на другой без ощутимых затрат времени.

♦ Лазерная резка позволяет выполнять острые углы, переходы без радиусов, тонкие перемычки (толщиной менее 1…2 мм).

♦ В роботизированных системах луч лазера позволяет осуществлять резку по сложному профилю в двух и даже трех измерениях, т.е. производить объемную резку.

Использование лазера особенно выгодно в тех случаях, когда требуется изготовление сложных деталей малыми сериями и большой номенклатуры. А в современном машиностроении такие, еще вчера считавшиеся уникальными заказы, становятся все более распространенными. Поэтому лазеры применяются для изготовления и испытания опытных образцов техники: корпусов автомобилей, оружия, беспилотных летательных аппаратов, деталей космических аппаратов и т.д.

Лазерные раскройные комплексы позволяют производить раскрой тонколистовых материалов со скоростью до 10…15 м/мин при точности 0,1…0,01 мм.

Обрабатываемые материалы – углеродистые и легированные стали, алюминиевые и титановые сплавы, неметаллические материалы (фанера, дерево, ДВП, ДСП, пластик, оргстекло, полиэфирное и акриловое стекло, ламинат, линолеум, резина, ткани, кожа, асбест, картон и т.д.).

Диапазон толщин материалов, обрабатываемых лазерной резкой, составляет 0,5…40 мм в зависимости от обрабатываемого материала и мощности лазера, табл. 2.1. В отдельных случаях возможна резка металла толщиной менее 0,2 мм.

Таблица 2.1 – Характерные толщины разрезаемых листов при мощности лазера P = 5 кВт

Материал	Толщина, мм
Углеродистые и легированные стали	до 40
Нержавеющая сталь	25
Медь	5
Латунь	12
Сплавы алюминия	12

2.2.Основные технологические показатели процесса лазерной резки

Основными параметрами режима лазерной резки*, определяющими технологические показатели процесса (точность, качество, производительность), являются:*

- плотность мощности излучения;
- давление и состав вспомогательного газа;

- диаметр сфокусированного пятна и т.д.

При импульсном режиме к данным параметрам добавляются:

- частота повторения импульсов;
- длительность импульсов;
- средняя мощность излучения.

Кроме того, на показатели качества и производительность лазерной резки влияют также поглощательная способность поверхности материалов, вид и свойства разрезаемых материалов.

Параметры получаемого реза при лазерной обработке металлов имеют много сходных характеристик с другими термическими способами резки.

В частности, *характеристики получаемого реза определяют следующие показатели:* глубина реза h, ширина реза b, ширина верхнего реза $b_в$, ширина нижнего реза $b_н$, протяженность зоны термического влияния $b_{зтв}$, точность, неровность реза – шероховатость R_z, неперпендикулярность (клиновидность) j, количество грата (наплыва на нижней кромке разрезаемого материала).

2.2.1. ***Производительность лазерной резки*** определяется скоростью резки и степенью автоматизации оборудования.

В свою очередь, скорость лазерной резки зависит от мощности излучения, толщины и теплопроводности материала, давления рабочего газа. В ряде случаев она значительно больше, чем при других способах резки, в том числе механической.

Зависимость скорости резки различных материалов от толщины заготовок (при постоянной мощности излучения) представлена на рис. 2.1.

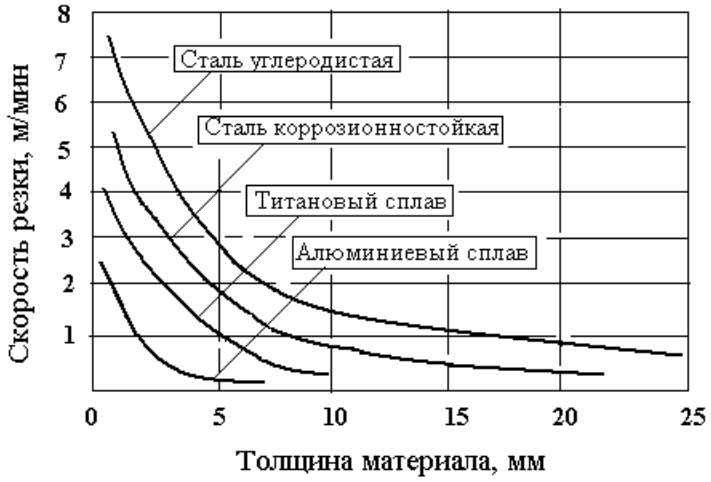


Рисунок 2.1 – Зависимость скорости резки от толщины материала

При обработке импульсным излучением линейная ***скорость резки*** V зависит от количества импульсов n (увеличивается с увеличением n), от диа-

метра элементарной лунки D, рис. 2.2 (увеличивается с увеличением D), от коэффициента перекрытия k_n и от времени обработки t:

$$V = \frac{L}{t} = \frac{nDk_n}{t}, \qquad (2.1)$$

где L – длина паза; $k_n = \frac{s}{D}$; s – шаг обработки.

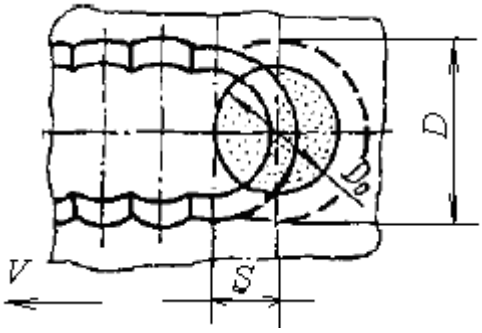


Рисунок 2.2 – Схема формирования реза импульсным излучением; D_0 – диаметр пятна фокусировки

При работе на лазерном оборудовании в импульсном периодическом режиме, определяемом частотой следования импульсов f, выражение для скорости резки принимает вид

$$V = Dk_n f = sf. \qquad (2.2)$$

Приведенная зависимость справедлива при небольшой толщине разрезаемого листа, когда под действием очередного импульса образуется сквозное отверстие.

2.2.2. Аналогично лазерной обработке отверстий, в общем случае размерные характеристики лазерной резки – ***глубина реза h и ширина b*** могут быть определены с помощью следующих соотношений:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{D_0}{2\,\mathrm{tg}\,(\phi/2)}\right)^3 + \frac{3E}{\pi k_п \mathrm{tg}^2(\phi/2) L_и \rho}} - \frac{D_0}{2\mathrm{tg}\,(\phi/2)}, \qquad (2.3)$$

$$b = 2\sqrt[3]{\left(\frac{D_0}{2}\right)^3 + \frac{3E\,\mathrm{tg}\,(\phi/2)}{\pi L_и \rho}}, \qquad (2.4)$$

где D_0 – диаметр пятна фокусировки; $\phi/2$ – половина угла светового конуса излучения; E – энергия излучения в импульсе; k_n – коэффициент перекрытия; $L_и$ – скрытая теплота испарения вещества; ρ – плотность материала.

2.2.3. ***Точность размерных параметров при резке*** импульсным излучением, аналогично точности прошивки отверстий, определяется погрешностями процесса, погрешностями оборудования, свойствами материала.

В основном погрешности обработки определяются погрешностями плотности мощности Δq, которые, в свою очередь, зависят от энергетических погрешностей, определяемых нестабильностью энергии ΔE и временными погрешностями импульса $\Delta\tau$, погрешностями фокусирования $\Delta\Phi$, приводящими к неточности размеров фокального пятна.

Кроме этих факторов, на точность реза влияют погрешности относительного перемещения луча и заготовки.

Поле рассеяния действительных размерных параметров реза (ширины) составляет 8…10 % номинального значения. С повышением шага обработки (ростом коэффициента перекрытия) поле рассеяния увеличивается.

Наиболее существенное влияние на погрешность ширины реза оказывает стабильность энергетических параметров импульсного излучения.

Высокая точность лазерной резки является одним из преимуществ над другими видами обработки листового материала. Так, например, точность позиционирования при гидроабразивной резке составляет ± 0,2 мм, точность резки ± 0,15 мм. При лазерной резке точность позиционирования ± 0,03 мм, а точность (повторяемость) резки ± 0,01 мм, что является определяющим фактором при необходимости выбора способа резки для технологической операции, после которой дополнительная обработка с целью «подгонки» размера экономически нецелесообразна.

Повышение качества и точности обработки обеспечивается уменьшением количества образующейся в процессе формирования отверстия жидкой фазы за счет обработки короткими импульсами и многоимпульсной обработки при минимальной энергии в импульсе.

Ориентировочные параметры режима резания CO_2-лазером различных материалов приведены в табл. 2.2, 2.3.

Таблица 2.2 – Параметры режима лазерной резки металлических материалов

Материал	Толщина листа, мм	Мощность лазера, Вт	Скорость резки, м/мин	Давление газа, МПа	Параметры реза		
					Ширина, мм	Глубина ЗТВ, мм	Шероховатость, мкм
Углеродистая сталь	1,0 10,0	1000 1000	6,0 0,37	0,15 0,15	0,41 0,82	0,08 0,4	- 80
Нержавеющая сталь	2,0	1000	3,5	0,25	0,39	0,98	-
Титан	2,0	1000	2,2	0,15	0,344	-	-
Алюминий	2,0	1000	0,2	0,15	0,377	-	-

Таблица 2.3 – Параметры режима лазерной резки неметаллических материалов

Материал	Толщина, мм	Скорость резки, м/мин	Мощность излучения, Вт
Асбоцемент	6,3	0,025	200
Бумага	Газетная	600	400
Картон	19,0	0,1	200
Мулар	0,025	300	300
Текстиль	0,45	50,0	400
Кварц	2,0	1,0	400
Стекло	9,53	1,52	20000
Оргстекло	1,5 12,7	3,0 4,6	400 20000
Стеклопластик	2,4	0,635	200
Фанера	17,0 25,4	0,5 1,5	500 8000
Нейлон	0,8	5,0	200
Кожа	3,2	0,635	200

2.2.4. ***Шероховатость поверхности резки*** формируется из-за неустойчивости самого процесса.

Так, ***шероховатость поверхности реза*** при импульсной обработке из геометрических соображений, рис. 2.3, определяется величинами D и s:

$$R_z = 0{,}5D - 0{,}5\sqrt{D^2 - s^2} = 0{,}5\,D(1 - \sqrt{1 - k_1^{\,2}}). \qquad (2.5)$$

Если $D \approx 2{,}44\lambda\dfrac{F}{d_0}$, где λ – длина волны излучения, мкм; F – фокусное расстояние фокусирующей оптики, мм; d_0 – диаметр фокусирующей линзы, мм, то

$$R_z = 1{,}22\lambda\frac{F}{d_0} - \frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{2{,}44\lambda F}{d_0}\right)^2 - s^2}\,. \qquad (2.6)$$

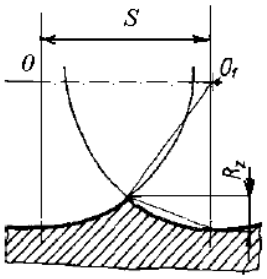


Рисунок 2.3 – Схема формирования микрорельефа импульсным излучением

Максимальное значение шероховатости поверхности, полученной лазерной резкой, может быть определено из следующего соотношения:

$$R_{z\,max} = 0{,}5\,D. \qquad (1.7)$$

Минимальная шероховатость поверхности кромки после резки лазером достигает $R_a \leq 3{,}2\ldots12{,}5$ мкм (при толщине стального листа от 0,5 до 12 мм). Для сравнения – при гидроабразивной резке шероховатость поверхности (R_z) составляет 20…60 мкм.

2.2.5. Качество реза определяется также наличием грата – прилипших к нижним кромкам реза застывших остатков материала или оксидов материала.

Материал в расплавленном состоянии с высоким коэффициентом поверхностного натяжения и низкой вязкостью трудно удалить с передней поверхности резки вспомогательным газом, что и приводит к образованию грата.

Оксиды, образуемые в процессе лазерной резки нержавеющей стали, такие как Cr_2O_3, имеют высокую температуру плавления (примерно 2180 °С), следовательно, застывают они быстрее, формируя грат.

2.2.6. Тепловая энергия, образующаяся в процессе лазерной резки, создает ***зону термического влияния*** в глубине кромки. Зона термического влияния – это часть основного материала, металлургическая структура которого изменяется (без расплавления).

Изменение структуры в зоне термического воздействия – это одна из важнейших характеристик, определяющих качество лазерной резки.

Зона термического влияния увеличивается с увеличением входной мощности на единицу длины и увеличением толщины обрабатываемого материала.

2.3. Оборудование для лазерной резки

Для резки обычно применяют *твердотельные и газовые лазеры.*

Серийные твердотельные лазеры (с активным элементом из рубина, неодимового стекла Nd-*Glass,* алюмоиттриевого граната, легированного иттербием Yb-*YAG* либо неодимом Nd-*YAG*) имеют сравнительно небольшую мощность, как правило, не превышающую 1…6 кВт.

В газовых лазерах в качестве активного тела применяется смесь газов, обычно углекислого газа, азота и гелия. Их общая мощность может достигать 20 кВт и выше (до 100…150 кВт у газодинамических лазеров).

Указанные типы лазеров имеют свои слабые и сильные стороны применительно к процессу лазерной резки.

Так, металлы лучше поглощают инфракрасное излучение с меньшей длиной волны (Nd-*YAG* – лазерное излучение), чем инфракрасное излучение с более длинной волной (CO_2 – лазерное излучение); Nd-*YAG* – лазерный луч

может быть сфокусирован в меньший диаметр, чем CO_2 – лазерный луч, его воздействие обеспечивает более высокую точность, меньшую ширину реза и низкую шероховатость поверхности.

Достоинством твердотельных лазеров является также возможность направления излучения по кварцевым волокнам, что позволяет привлечь гибкий способ управления лучом и напрямую связать его с соответствующим промышленным роботом.

При этом твердотельные лазеры менее эффективны при обработке ряда неметаллов, которые полностью или частично прозрачны для излучения с длиной волны около 1 мкм (например, оргстекло).

Углекислотные лазеры более универсальны и применяются для обработки широкого круга материалов. Кроме того, в лазерах данного типа наблюдается низкая расходимость луча, что дает возможность разместить источник излучения далеко от зоны обработки без потери качества луча. Для данного типа лазеров характерны также высокий КПД (выше 10 %, у твердотельных – до 5 %), большая выходная мощность, высокая надежность и длительный срок службы.

Для резки черных металлов в основном требуется мощность лазера от 450…500 Вт и выше, для цветных металлов – от 1кВт и выше.

Режим излучения применяемых лазеров может быть как непрерывным, так и импульсным.

Высокомощные лазеры, работающие ***в непрерывном режиме***, предпочтительны для высокопроизводительной лазерной резки, особенно при резке материалов большой толщины, поскольку при высоком среднем уровне мощности может быть достигнута более высокая скорость резания.

Однако при непрерывном режиме лазерной резки удаление расплавленного или испаренного материала недостаточно эффективно для предотвращения передачи тепла в боковые поверхности разреза, как следствие происходит дополнительный нагрев материала и ухудшение качества резки.

Для интенсификации процесса резки непрерывным излучением обычно совместно с лазерным излучением подается *струя газа*, которая служит для удаления продуктов эрозии из зоны обработки, предотвращения окисления (горения) материала, а в ряде случаев интенсифицирует экзотермическую реакцию в зоне лазерного воздействия. Подобный процесс лазерной обработки называют ***газолазерной резкой***.

В последнем случае для этих целей используется кислород, сжатый воздух, в то время как для создания защитной среды применяют инертные газы – аргон, азот, гелий.

Газ обычно подается соосно с лучом с помощью специального сопла, рис. 2.4.

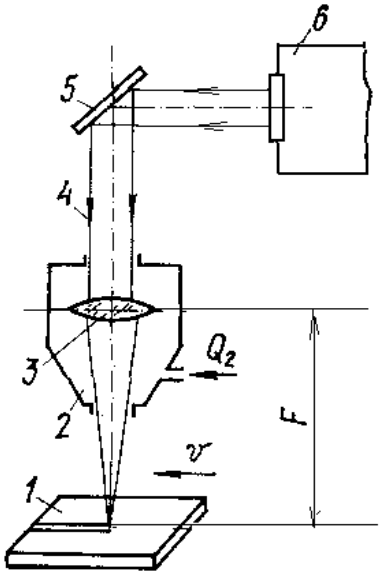


Рисунок 2.4 – Схема газолазерной резки:
1 – заготовка; *2* – сопло для подачи рабочего газа; *3* – фокусирующая линза; *4* – лазерный луч; *5* – поворотное зеркало; *6* - лазер

Более низкий по энергетическому уровню ***импульсный режим*** лазерной резки предпочтителен для прецизионной лазерной резки тонколистовых конструкций, фрезерования пазов в конструкционных материалах.

Данный режим обеспечивает более высокое качество резки по сравнению с непрерывным излучением, так как высокомощный короткий лазерный импульс эффективно нагревает заготовки и способствует удалению расплава (испарения) из зоны резания, снижая формирование грата. При этом средний уровень мощности невысок по сравнению с непрерывным излучением, что в итоге приводит к снижению скорости обработки (производительности).

Импульсный режим лазерной резки также имеет преимущество при резке материалов с большим коэффициентом теплопроводности и при резке деталей со сложной геометрией реза, когда необходим прорез наименьшей ширины и недопустим перегрев заготовки.

2.4. Расчет стоимости лазерной резки деталей

Стоимость резки детали вычисляется, исходя из времени работы установки. В свою очередь, время работы зависит от следующих параметров:

- длины реза L;

- толщины металла h;
- типа материала;
- количества контуров в детали (для реза каждого контура станок производит врезку) $n_к$;
- сложности контура (сложный контур замедляет перемещение режущей головки).

Формула для расчета цены одной детали $C_{дет}$, грн, имеет следующий вид:

$$C_{дет} = C_{уд}\, L(1 + 0{,}5\, n_к), \qquad (2.8)$$

где $C_{уд}$ – стоимость лазерной резки 1 м погонного данного материала в зависимости от толщины, табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Стоимость резки различных материалов (грн/м)

Материал	Толщина металла, мм								
	0,5..1,5	1,6..2,5	2,6…3,0	3,1…4,0	4,1…5,0	5,1…6,0	6,1…8,0	8,1…10,0	10,0…16,0
Сталь углеродистая	8,2	10,5	12,5	14,6	16,5	19,4	30,0	55,0	84,0
Сталь нержавеющая	11,3	17,8	23,8	27,4	32,7				
Алюминий	13,5	18,5	24,5						
Титан	15,7	19,2	26,8						

3. ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с основными техническими параметрами лазерной установки «Квант-12» (см. предыдущую работу) и выполнить резку образца углеродистой стали толщиной 3 мм.

2. Произвести контроль геометрических показателей и качества поверхности полученного реза с помощью с помощью металлографического микроскопа МИМ-7.

3. Рассчитать скорость лазерной резки различных материалов, используя соотношение (2.2). Исходные данные приведены в табл. 3.1.

4. Сопоставить полученные результаты с рекомендуемыми значениями, рис. 2.1.

5. В соответствии с соотношением (2.7) и исходными данными, табл. 3.1, рассчитать максимальную шероховатость поверхности реза $R_{z\ мах}$, мкм.

6. Используя соотношение (2.8) и данные, приведенные в табл. 2.4, рассчитать стоимость лазерной резки детали; $L = Vt$; $t = n\tau$.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета скорости лазерной резки и шероховатости поверхности

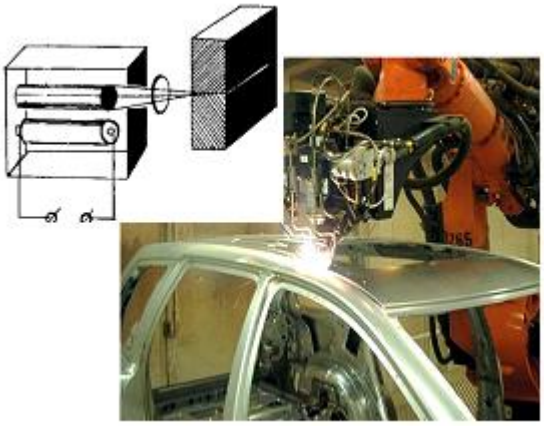
№ варианта	Обрабатываемый материал	Толщина листа, мм	Тип лазера	Фокусное расстояние F, мм	Радиус пятна фокусировки лазерного излучения R_0, мкм	Длительность импульса τ, мс	Шаг обработки s, мм	Частота следования импульсов f, Гц	Количество импульсов n	Количество контуров в детали $n_к$
1,16	Углеродистая сталь	2,3	Nd-*YAG*, имп.	74	10	6	0,65	150	400	10
2,17	Углеродистая сталь	3,2	Nd-*YAG*, имп.	68	15	8	0,55	120	800	35
3,18	Углеродистая сталь	5,8	CO_2, имп.	42	40	10	0,25	150	600	28
4,19	Углеродистая сталь	15,7	CO_2, имп.	42	50	10	0,15	130	800	44
5,20	Коррозионностойкая сталь	1,4	Nd-*YAG*, имп.	74	12	8	0,70	120	1000	65
6,21	Коррозионностойкая сталь	2,0	Nd-*YAG*, имп.	78	10	6	0,65	130	1000	33
7,22	Коррозионностойкая сталь	2,2	CO_2, имп.	48	58	20	0,55	120	800	15
8,23	Коррозионностойкая сталь	4,4	CO_2, имп.	36	65	30	0,35	100	700	37
9,24	Титановый сплав	1,3	CO_2, имп.	66	70	40	0,55	100	300	77
10,25	Титановый сплав	1,7	CO_2, имп.	60	69	45	0,45	90	300	52
11,26	Титановый сплав	2,6	CO_2, имп.	68	75	50	0,40	80	400	48
12,27	Титановый сплав	3,0	CO_2, имп.	70	68	50	0,45	90	500	36
13,28	Алюминиевый сплав	0,8	CO_2, имп.	72	88	60	0,65	50	900	25
14,29	Алюминиевый сплав	2,3	CO_2, имп.	104	100	100	0,20	35	700	84
15,30	Алюминиевый сплав	2,8	CO_2, имп.	110	100	100	0,40	40	800	37

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Основные технологические показатели лазерной резки материалов.
3. Расчет скорости лазерной резки, шероховатости поверхности, стоимости лазерной резки.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. В чем физическая сущность лазерной резки материалов?
2. Каковы основные преимущества лазерной резки по сравнению с другими аналогичными технологиями?
3. Каковы основные области применения лазерной резки?
4. Какие материалы подвергают лазерной резке?
5. Укажите диапазон толщин материалов при лазерной резке.
6. Назовите основные технологические показатели лазерной резки.
7. Каковы значения скорости лазерной резки различных материалов, от чего она зависит?
8. Какими параметрами определяются глубина и ширина лазерного реза?
9. От каких факторов зависит точность размерных параметров при резке?
10. Какими факторами определяется шероховатость поверхности лазерного реза, каковы условия определения максимальной шероховатости?
11. Какие типы оборудования применяют для лазерной резки?
12. В чем достоинства и недостатки твердотельных и газовых лазеров при лазерной резке?
13. Какие типы лазеров используют для резки металлических и неметаллических материалов и почему?
14. Каковы особенности импульсного и непрерывного режимов работы лазеров в процессе резки?
15. В чем сущность газолазерной резки?
16. Какими факторами определяется стоимость лазерной резки различных материалов?



ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

«ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- ознакомиться с сущностью лазерной сварки;
- рассчитать основные технологические параметры процесса.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Одним из наиболее важных направлений применения лазеров в машиностроении, приборостроении, медицине является *лазерная сварка* (общепринятое обозначение – *LBW – Laser Beam Welding* – сварка лазерным лучом).

Основными достоинствами лазерной сварки по сравнению с традиционными способами являются следующие.

♦ При лазерной сварке обеспечиваются высокие точность и производительность (скорость) процесса. Скорость лазерной сварки непрерывным излучением в несколько раз превышает скорость традиционных способов сварки плавлением и может достигать 500 м/ч. Скорость сварки импульсным излучением сопоставима с традиционными способами сварки.

♦ Лазерной сваркой можно соединять различные материалы толщиной от нескольких микрометров до десятков миллиметров. Соединяют однородные и разнородные металлы (Au-Ge, Au-Si, Ni-Ta), в том числе с большой разницей в температуре плавления (W-Al, Cu-Ta), металлы с неметаллами (керамикой, стеклом), неметаллические материалы.

♦ Лазерную сварку производят как на воздухе, так и в среде защитных газов – аргона, CO_2.

♦ Лазерный луч легко управляется и регулируется, с помощью зеркальных оптических систем легко транспортируется и направляется в труднодоступные для других способов места. В отличие от электронного луча и электрической дуги на лазерный луч не влияют магнитные поля, что обеспечивает стабильное формирование шва.

♦ Из-за высокой концентрации энергии (в пятне диаметром 0,1 мм и менее) в процессе лазерной сварки обеспечиваются небольшой объем сварочной ванны, малая ширина зоны термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения. Это, в свою очередь, обусловливает высокую технологическую прочность сварных соединений, небольшие деформации сварных конструкций.

♦ Лазерная сварка производится как со сквозным проплавлением (шов образуется по всей толщине свариваемых участков деталей), так и с частич-

ным. Сварные швы одинаково хорошо формируются в любом пространственном положении.

♦ При лазерной сварке можно достичь большого отношения глубины к ширине проплавленного материала (так называемый «кинжальный» или «ниточный» шов).

Лазерная сварка выполняется как твердотельными, так и газовыми лазерами; режим излучения может быть непрерывным и импульсным.

Для сварки используют, как правило, мощные (до 15 кВт в режиме глубокого проплавления) непрерывные CO_2-лазеры, импульсные твердотельные Nd:*YAG*-лазеры, а также волоконные лазеры (мощностью 5…20 кВт).

Оборудование для лазерной обработки вообще и для сварки в частности включает в себя следующие основные элементы, рис. 2.1: источник когерентного излучения – технологический лазер; систему транспортировки, отклонения и фокусировки излучения; систему наблюдения; систему газовой защиты изделия; оснастку для крепления и перемещения изделия; средства контроля параметров процесса.

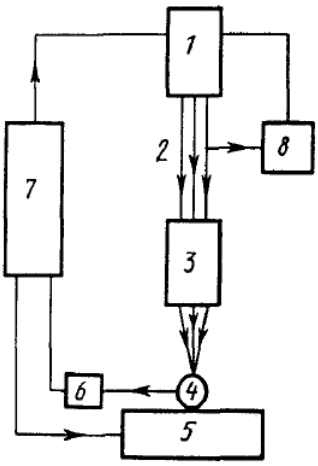


Рисунок 2.1– Схема лазерной сварочной установки:
1 – технологический лазер; *2* – лазерное излучение; *3* – оптическая система;
4 – обрабатываемая деталь; *5* – устройство для закрепления и перемещения детали;
6 – датчики параметров технологического процесса; *7* – программное устройство;
8 – датчики параметров излучения

2.1. Классификация методов лазерной сварки

В основу *классификации методов лазерной сварки* положены три группы признаков:

- энергетические признаки, к которым относятся плотность мощности и длительность воздействия излучения;

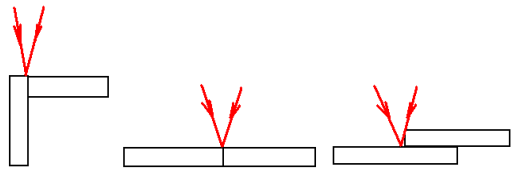
- технологические признаки, по которым различают сварку металлов с глубоким проплавлением и сварку деталей малых толщин;

- экономические признаки.

Применением импульсных режимов можно существенно увеличить эффективность процесса лазерной сварки. При частоте импульсов 0,4…1 кГц и длительности 20…50 мс глубина проплавления может быть увеличена в 3…4 раза по сравнению с непрерывным режимом.

При импульсном режиме КПД луча в 2…3 раза выше, чем при непрерывном. Однако импульсная сварка требует точной наводки луча на стык, более высокого качества подготовки кромок к сварке, а ее скорость в несколько раз уступает скорости сварки с непрерывным излучением, см. выше.

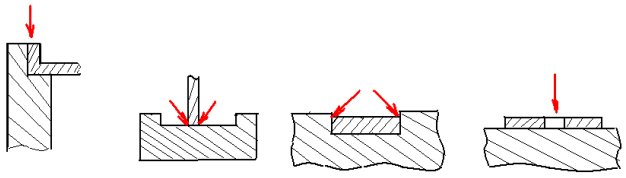
Сварка импульсным лазерным излучением наиболее распространена в электронной и электротехнической промышленности, где сваривают угловые, стыковые и нахлесточные соединения тонкостенных деталей, рис. 2.2, *а,б,в* соответственно.



а *б* *в*

Рисунок 2.2 - Виды соединений тонкостенных деталей

Хорошее качество соединений обеспечивается импульсной сваркой лазерным лучом тонких деталей (0,05…0,5 мм) с массивными. В этом случае, если свариваемые детали значительно отличаются по толщине, в процессе сварки луч смещают на массивную деталь, чем выравнивают температурное поле и достигают равномерного проплавления обеих деталей. Чтобы снизить разницу в условиях нагрева и плавления таких деталей, толщину массивной детали в месте стыка уменьшают, делая на ней бурт, технологическую отбортовку или выточку, рис.2.3.



а *б* *в* *г*

Рисунок 2.3 – Сварные соединения деталей разной толщины:
а – по бурту на массивной и отбортовке на тонкой детали; *б* – тавровое соединение; *в* – по кромке выточки на массивной детали; *г* – по отверстию в тонкой детали. Стрелками показано направление лазерного луча

Детали малой толщины можно сваривать также газовыми и твердотельными лазерами непрерывного действия мощностью до 1кВт.

При реализации лазерной сварки возможно выполнение двух видов сварки – точечной и шовной. Точечная сварка обычно производится с помощью импульсного излучения. Шовную сварку можно выполнить как импульсным излучением при последовательном наложении зон лазерного воздействия с перекрытием, так и с помощью непрерывного излучения.

Точечная сварка получила распространение с первых дней появления импульсных твердотельных лазеров для выполнения неразъемных соединений в электронике и приборостроении.

Точечной сваркой соединяют тонкие листовые материалы (при толщине 0,5…2 мм), проволоку диаметром от 10 до 500 мкм, приваривают проволоку к подложке, тонкие листы к массивным элементам, рис. 2.4.

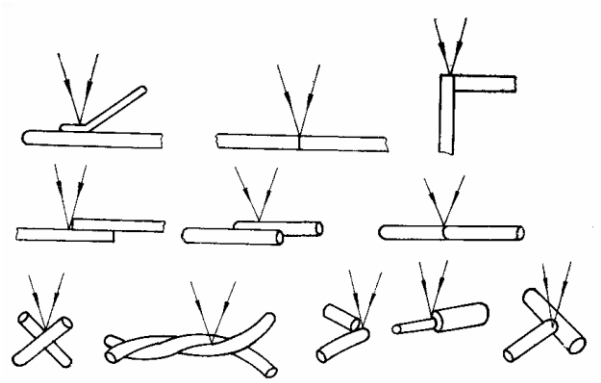


Рисунок 2.4 – Типы соединений, выполняемых точечной сваркой

Производительность точечной сварки определяется частотой следования импульсов, если вспомогательное время соизмеримо с интервалами между импульсами. Для сокращения вспомогательного времени возможно применение сканирования излучения или нанесение сварных точек на быстродвижущейся заготовке. С учетом того, что с повышением частоты следования импульсов в существующих установках на твердом теле значительно уменьшается энергия в импульсе, и того, что при импульсной сварке диапазон применяемых энергий в импульсе составляет $E = 0{,}5\ldots50$ Дж, достижимый уровень частот – 150… 1 Гц.

Таким образом, достижимая производительность точечной сварки ~ 150 сварных точек в секунду.

Шовная лазерная сварка применяется не только для обеспечения надежного механического, электрического соединения свариваемых элементов, но и для достижения высокой герметичности соединяемых деталей. Лазерная шовная сварка может осуществляться как с помощью импульсного излучения

с высокой частотой следования импульсов, так и с помощью непрерывного излучения. Последнее используется сейчас наиболее широко для соединения толстостенных деталей с высокой производительностью.

Промышленные сварочные установки с твердотельными лазерами позволяют вести шовную сварку со скоростью до 5 мм/с при частоте импульсов до 20 Гц.

Различные типы соединения деталей шовной лазерной сваркой показаны на рис. 2.5.

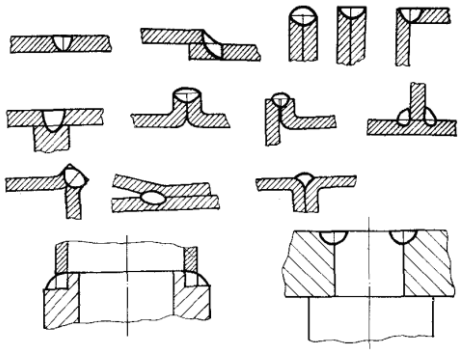


Рисунок 2.5 – Типы соединений, выполняемых шовной лазерной сваркой

Шовная сварка импульсным излучением применяется в основном для герметизации изделий небольших размеров в тех случаях, когда теплоподвод должен быть строго ограничен, например, в производстве кварцевых резонаторов, в том числе для наручных электронных часов.

Наглядным примером эффективности использования импульсного излучения для шовной сварки деталей из разнотипных материалов является изготовление рабочих элементов теплообменного оборудования, которые представляют собой конструкцию, выполненную из набора тонкостенных труб, рис. 2.6.

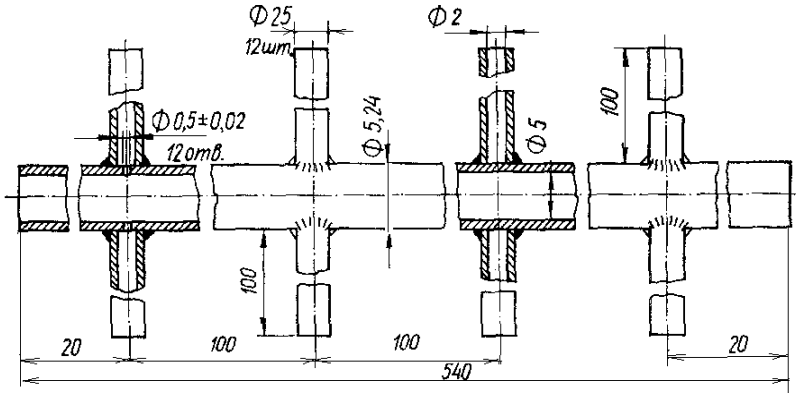


Рисунок 2.6 - Конструкция рабочего элемента теплообменного оборудования

По традиционной технологии соединение трубок из меди и нержавеющей стали возможно лишь пайкой серебром с применением флюса. Ее суще-

ственный недостаток помимо большой трудоемкости и сложности – невозможность полного удаления флюса из капиллярных отверстий.

2.2. Особенности формирования сварочной ванны и сварного шва

Сварочная ванна при лазерной сварке имеет характерную форму, вытянутую в направлении сварки, рис. 2.7, отличную от формы сварного шва при традиционных способах, например, при дуговой сварке.

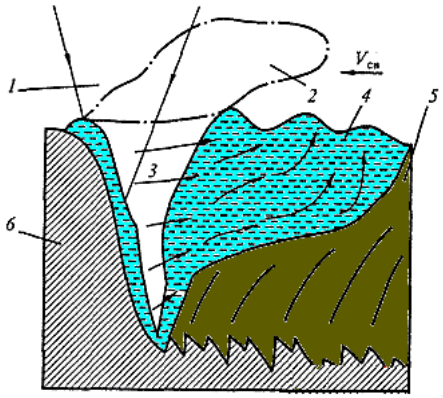


Рисунок 2.7 – Схема сварочной ванны при лазерной сварке:
1 – лазерный луч; *2* – плазменный факел; *3* – парогазовый канал; *4* – хвостовая часть шва; *5* – металл шва; *6* – свариваемый металл

В головной части ванны расположен канал (кратер) 3. Это область наиболее яркого свечения. На передней стенке канала существует слой расплавленного металла. Перенос металла из головной части в хвостовую происходит по боковым стенкам в горизонтальном направлении.

В хвостовой части ванны 4 расплавленный металл завихряющимися потоками поднимается вверх и выносится на поверхность сварочной ванны.

При образовании канала 3 над поверхностью металла появляется светящийся факел 2, состоящий из продуктов испарения, мелких капель металла, выбрасываемых из ванны, и из частиц конденсированного пара.

При значительной скорости сварки факел отклоняется на 20…60° в сторону, противоположную направлению сварки. Этот факел поглощает часть энергии луча и снижает его проплавляющую способность.

Форма сварочной ванны в продольном сечении также отличается от ее формы при дуговой сварке, рис. 2.8.

На поверхности фронта кристаллизации имеется выступ, который делит ванну на две характерные части. Нижняя часть значительно заглублена и имеет малую протяженность в поперечном сечении, тогда как верхняя часть более широкая и вытянута вдоль шва. Отсюда очевидно, что при лазерной сварке имеют место два процесса проплавления металла.

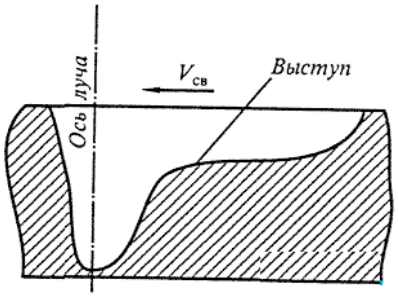


Рисунок 2.8 - Продольное сечение сварочной ванны

Первый процесс связан с образованием канала, как это было показано выше. Именно он обеспечивает эффект глубокого проплавления. Второй процесс – поверхностное плавление за счет теплопроводности свариваемого материала. Преимущественное развитие того или иного процесса зависит от режима сварки и определяет очертания сварочной ванны.

При использовании излучения мощностью несколько киловатт и выше энергия излучения подается на поверхность обрабатываемого материала быстрее, чем ее можно отвести механизмом теплопроводности. Поэтому в материале за счет испарения прошивается отверстие, через которое энергия излучения передается вглубь материала, т.е. в этом случае удается подать энергию на большую глубину, чем это возможно механизмом теплопроводности.

Реализуется так называемое «кинжальное» проплавление, так как в сечении сварочная ванна имеет форму заостренного клинка, рис. 2.9. При относительном перемещении излучения и обрабатываемого материала перемещается и полученное отверстие, которое затем заполняется расплавом.

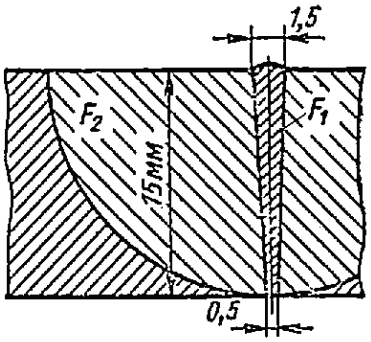


Рисунок 2.9 – «Кинжальное» проплавление:
F_1 – площадь сварного шва при лазерной сварке ;
F_2 – площадь сварного шва при электродуговой сварке

Рассмотренный механизм позволяет осуществить сварку с глубоким проплавлением. Если при малых уровнях мощности излучения и передаче тепла в материал за счет теплопроводности отношение глубины к ширине шва равно примерно 1...2, то при глубоком («кинжальном») проплавлении в условиях воздействия мощного излучения это отношение может достигать 10 и более.

Сварка в режиме глубокого («кинжального») проплавления используется при изготовлении шестерен коробки передач автомобиля, карданного вала.

Определенные возможности технология глубокого проплавления открывает для надежного соединения труб газопроводов большого диаметра. Возможно получение как продольных, так и поперечных, наружных и внутренних швов. При мощности излучения P = 16 кВт возможно получение соединения с глубиной проплавления до 19 мм со скоростью обработки 0,8 м/мин.

2.3. Качество сварного шва при лазерной сварке материалов

Высокая концентрация энергии, большая скорость лазерной сварки по сравнению с дуговыми способами, незначительное тепловое воздействие на околошовную зону вследствие высоких скоростей нагрева и охлаждения металла существенно повышают сопротивляемость большинства конструкционных материалов образованию горячих и холодных трещин. Это обеспечивает высокое качество сварных соединений из материалов, плохо свариваемых другими способами сварки. Существенно (до десяти раз) снижаются деформации сваренных деталей, что снижает затраты на правку.

Качество сварного соединения определяется его прочностью, отсутствием дефектов, размерами зоны термического влияния.

Основными видами дефектов сварного шва при лазерной сварке больших толщин являются неравномерность проплавления корня шва и наличие полостей в шве.

Для устранения подобных дефектов применяют различные технологические приемы, например, повышают скорость сварки или отклоняют лазерный луч от вертикали на 15…17° по направлению движения луча.

Для сварки с глубоким проплавлением, аналогично дуговой сварке, с целью повышения качества шва применяют различные способы защиты металла шва от окисления. Для этого через специальные сопла в зону сварки подают защитный газ, рис. 2.10.

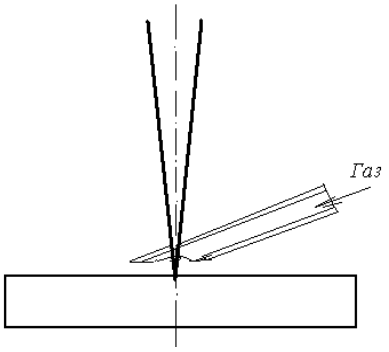


Рисунок 2.10 – Применение защитных газов при лазерной сварке

Для сварки высокоактивных металлов (алюминия, титана) применяют также дополнительную защиту корня шва с помощью подачи аргона, гелия или их смесей.

Для защиты зоны лазерной сварки можно также использовать флюсы того же состава, что и при дуговой сварке (в виде обмазок, наносимых на свариваемые кромки).

Качество соединения зависит от многих факторов, прежде всего, от параметров режима лазерной сварки, типа свариваемых материалов.

Размеры сварочной ванны – глубина h, диаметр проплавления d, определяющие прочность сварного соединения, зависят от энергии, затраченной на нагрев, времени и плотности мощности лазерного воздействия. С увеличением энергии E и глубина, и диаметр сварочной ванны возрастают.

На качество сварного шва в значительной мере влияет *диаметр фокусировки луча* D, значения которого обычно составляют 0,5…1,0 мм. При сварке D изменяют путем расфокусировки луча. При этом фокальную плоскость, на которой сфокусированный световой пучок имеет наименьший диаметр, располагают выше или ниже поверхности свариваемых деталей.

Диаметр сфокусированного излучения D определяет площадь нагрева и плотность мощности q.

При диаметре менее 0,5 мм повышенная плотность мощности приводит к перегреву расплавленного металла, усиливает его испарение, появляются дефекты сварного шва. При диаметре более 1,0 мм снижается эффективность процесса сварки.

В значительной мере качество шва зависит также от *вида свариваемых материалов*, прежде всего, от их теплофизических свойств. Так, для теплопроводных материалов (например, меди) параметры сварочной ванны больше, чем, например, для никеля и молибдена, имеющих более низкие показатели теплопроводности.

Лазерное излучение позволяет получать сварные соединения различных металлов, тем не менее не все металлы поддаются качественной сварке, т.е. свариваемость разных металлов различна.

Так, цинк, алюминий, олово, тантал или вольфрам трудно свариваются в отличие от малоуглеродистой стали, никеля, палладия, платины, золота.

Если применить десятибальную систему, при которой 10 баллов характеризуют лучшее качество, соответствующее соединению одноименных

металлов, а 1 – худшее качество, то эффективность сварки разных металлов друг с другом можно оценить следующим образом, табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Свариваемость различных металлов лазерной сваркой

Металл	Ag	Al	Cr	Cu	Fe	Mo	Ni	Pd	Pt	Sn	Ta	Ti	W
Ag	10	5	1	4	2	1	1	9	4	1	1	4	1
Al	5	10	1	1	1	1	4	1	1	1	1	4	1
Cr	1	1	10	1	9	9	8	6	7	1	1	7	9
Cu	4	4	1	10	4	1	9	8	8	1	1	4	1
Fe	2	4	9	4	10	7	7	6	6	1	4	4	1
Mo	1	1	9	1	7	10	4	6	6	1	9	9	9
Ni	1	4	8	9	7	4	10	8	8	1	7	4	3
Pd	9	1	6	8	6	6	8	10	8	3	6	3	3
Pt	4	1	7	8	6	6	8	8	10	4	4	3	6
Sn	1	1	1	1	1	1	1	3	4	10	1	1	1
Ta	1	1	1	1	4	9	7	6	4	1	10	9	9
Ti	4	4	7	4	4	9	4	3	3	1	9	10	3
W	1	1	9	1	4	9	3	3	6	1	9	3	10

2.4. Основные параметры режима лазерной сварки

Основными параметрами режима импульсной лазерной сварки являются плотность мощности лазерного излучения q, длительность его действия (длительность импульса) t, диаметр сфокусированного излучения D.

По энерговкладу в единицу объема обрабатываемого материала лазерная сварка занимает промежуточное положение между поверхностной термообработкой и резкой.

На практике лазерную сварку металла небольшой толщины (0,5…1,0 мм) ведут при $q = 10^5 \ldots 10^7$ Вт/см^2. При данных значениях плотности мощности излучения происходит активный локальный разогрев материала без заметного испарения.

Превышение верхнего предела q (до $10^7 \ldots 10^9$ Вт/см^2) вызывает интенсивное объемное кипение и испарение, приводящее к выбросам металла и дефектам шва.

При $q < 10^5$ Вт/см^2 лазерное излучение теряет свое основное достоинство – высокую концентрацию энергии.

Варьирование q и t позволяет сваривать лазерным лучом различные конструкционные материалы разного диапазона толщин.

Длительность импульсов приближенно определяется из соотношения

$$\tau = \delta^2/(4a), \qquad (2.1)$$

где δ и a – соответственно толщина и коэффициент температуропроводности свариваемого материала.

Значения τ для тонких деталей (δ = 0,1…0,2 мм) составляют несколько миллисекунд. При увеличении δ более 1,0 мм длительность импульса возрастает и может значительно превосходить достижимую длительность лазерных импульсов. Поэтому лазерная сварка металлов толщиной более 1,0 мм импульсным излучением затруднительна.

При сварке деталей толщиной более 1,0 мм на проплавляющую способность луча в первую очередь влияет мощность излучения. Поскольку сварка таких деталей ведется при непрерывном излучении, то к основным параметрам режима здесь относится и скорость сварки. При выбранном значении мощности излучения скорость сварки определяют, исходя из особенностей формирования шва: минимальное значение скорости ограничено отсутствием «кинжального» проплавления, а максимальное – ухудшением качества шва, появлением пор, непроваров.

2.5. Целесообразность применения лазерной сварки

Широкое применение лазерной сварки сдерживается экономическими соображениями, поскольку стоимость технологических лазеров пока еще достаточно высока.

Однако если применение традиционных способов не дает желаемых результатов либо технически неосуществимо, можно рекомендовать лазерную сварку.

К таким случаям относится необходимость получения прецизионной (высокоточной) конструкции, форма и размеры которой не должны меняться в процессе сварки.

Лазерная сварка целесообразна, когда она позволяет значительно упростить технологию изготовления изделий и применяется как заключительная операция, без последующей правки или механической обработки.

Экономически эффективна лазерная сварка, когда необходимо существенно повысить производительность, поскольку скорость ее может быть в несколько раз больше, чем у традиционных способов.

При изготовлении крупногабаритных конструкций малой жесткости или с труднодоступными швами, а также при необходимости соединения трудносвариваемых, в том числе разнородных материалов, лазерная сварка может оказаться единственным процессом, обеспечивающим качественные сварные соединения.

Лазерная сварка широко распространена в электронной и радиотехнической промышленности, в ювелирном деле. Сварка с глубоким проплавлением используется в авиационной промышленности, в судостроении.

В автомобильной промышленности применяются роботизированные лазерные комплексы с большим числом степеней свободы, что позволяет использовать их в кузовном производстве.

3. ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с сущностью лазерной сварки, ее основными достоинствами по сравнению с традиционными способами, основными разновидностями и областями применения.
2. Изучить технические возможности лазерной установки «Квант-12» при проведении сварки металлов и сплавов малых толщин.
3. Выбрав необходимые параметры режима работы установки, осуществить точечную сварку деталей из углеродистой стали толщиной 1,5 мм.
4. Сопоставить качество точечной лазерной и электроконтактной сварки с помощью оптического микроскопа МИМ-7.
5. Рассчитать основные технологические параметры лазерной сварки.

   ♦ Используя исходные данные, табл. 3.1, в соответствии с формулой (2.1) рассчитать длительность лазерных импульсов τ, с.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета параметров лазерной сварки

№ варианта	Свариваемый материал	Температуропроводность a, см^2/с	Глубина проплавления δ, мм	Энергия импульса E, Дж	Диаметр пятна фокусировки d, мм	Коэффициент перекрытия световых импульсов $k_п$	Частота следования импульсов f, Гц	Длина сварного шва L, м
1,21	Углеродистая сталь	0,119	0,25	8	0,40	0,2	20	2,0
2,22	Коррозионно-стойкая сталь	0, 056	0,30	10	0,45	0,3	25	3,5
3,23	Алюминий	0,474	0,45	12	0,55	0,4	30	0,43
4,24	Вольфрам	0,62	0,80	9	0,67	0,5	35	0,55
5,25	Углеродистая сталь	0,119	0,47	11	0,60	0,6	40	0,62
6,26	Медь	0,95	0,78	10	0,72	0,7	45	1,7
7,27	Медь	0,95	0,87	11	0,74	0,8	50	2,2
8,28	Железо	0,21	0,42	12	0,77	0,9	27	3,8
9,29	Алюминий	0,474	0,55	13	0,81	0,2	38	4,9
10,30	Медь	0,95	0,64	14	0,83	0,3	49	5,7
11	Никель	0,24	0,45	7	0,84	0,4	54	6,6

Продолжение табл. 3.1

12	Никель	0,24	0,30	9	0,85	0,5	68	0,75
13	Нерж сталь	0,056	0,33	9	0,92	0,6	23	0,82
14	Алюминий	0,474	0,48	10	0,96	0,7	42	3,5
15	Никель	0,24	0,45	11	1,00	0,8	54	4,4
16	Титан	0,08	0,26	6	1,10	0,9	68	0,59
17	Титан	0,08	0,36	7	1,20	0,5	36	0,63
18	Вольфрам	0,62	0,89	9	0,50	0,4	45	0,78
19	Вольфрам	0,62	0,54	10	0,60	0,6	55	0,81
20	Титан	0,08	0,65	12	0,55	0,7	27	1,0

♦ Рассчитать плотность мощности лазерного излучения q, Вт/см^2 для реализации сварки данных заготовок

$$q = \frac{E}{s\tau}, \qquad (3.1)$$

где E – энергия лазерного импульса, Дж; s – площадь пятна фокусировки, см^2.

♦ Рассчитать производительность (скорость) лазерной сварки V, м/с:

$$V = dk_п f, \qquad (3.2)$$

где $k_п$ – коэффициент перекрытия импульсов; f – частота следования импульсов.

♦ Определить длительность технологического процесса t, ч

$$t = L/V. \qquad (3.3)$$

♦ Определить мощность теплового потока внутри заготовки P, кВт

$$P = qs\ . \qquad (3.4)$$

♦ Определить энергоемкость процесса Q, кВт·ч

$$Q = Pt\ . \qquad (3.5)$$

♦ Рассчитать стоимость лазерной сварки партии деталей, грн:

$$C_{дет} = C_{уд} \cdot L \cdot n, \qquad (3.6)$$

где $C_{уд}$ – стоимость выполнения сварного шва длиной 1 м заданной глубины проплавления, табл. 3.2; L – длина сварного шва, м (табл. 3.1); n – количество деталей в партии, табл. 3.3.

Таблица 3.2 – Удельная стоимость лазерной сварки $C_{уд}$ (грн/м)

Материал	Глубина проплавления, мм							
	0,1…0,25	0,3…0,45	0,5…0,65	0,7..0,85	0,9…1,05	1,1…1,25	1,3…1,45	1,5…1,65
Сталь углеродистая	0,4	0,55	0,65	0,76	0,85	0,95	3,0	5,5
Сталь нержавеющая	1,1	1,7	2,38	2,74	3,27	3,58	4,25	4,73
Никель	1,15	1,72	2,40	2,81	3,35	3,62	4,57	5,38
Алюминий	1,35	1,85	2,45	3,24	3,89	4.86	5,46	6,53
Медь	1,45	1,92	2,64	3,38	3,97	4,97	5,68	6,65
Титан	1,57	2,32	3,48	3,94	4,53	5,45	6,67	6,95
Вольфрам	1,71	2,57	4,35	4,78	5,21	5,93	7,25	7,78

Таблица 3.3 – Количество деталей в партии

№ варианта	Количество деталей
1,11,21	24
2,12,22	55
3,13,23	45
4,14,24	110
5,15,25	32
6,16,26	47
7,17,27	17
8,18,28	8
9,19,29	13
10,20,30	32

6. Оценить свариваемость данного материала с другими металлами (табл.2.1); подобрать наиболее эффективные варианты.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Схема установки для лазерной сварки.
3. Основные виды лазерной сварки.
4. Расчет основных технологических параметров лазерной сварки.

Контрольные вопросы

1. Опишите сущность и основные достоинства лазерной сварки.
2. Укажите классификацию способов лазерной сварки.
3. Сопоставьте возможности импульсной и непрерывной лазерной сварки.
4. Какие основные компоненты входят в состав лазерной сварочной установки?
5. Какие типы лазеров применяют для сварки?
6. Каков диапазон плотностей мощности при лазерной сварке? Какими факторами он ограничен?
7. Какие применения шовной и точечной лазерной сварки Вам известны?
8. В чем специфика формирования сварочной ванны при лазерной сварке?
9. Какими параметрами определяется качество сварного шва, полученного лазерной сваркой?
10. В чем сущность «кинжального» проплавления?

11. Какие виды излучения наиболее рациональны для сварки металла малых и больших толщин?
12. Каковы основные технологические параметры процесса лазерной сварки? Какими параметрами они определяются?
13. В каких случаях лазерная сварка целесообразна для получения неразъемных соединений материалов?
14. Какие сочетания свариваемых материалов наиболее эффективны при лазерной сварке?
15. Какими параметрами определяется производительность лазерной сварки? Сопоставьте производительность лазерной сварки с традиционными способами.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

«КРИТЕРИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ»

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

♦ ознакомиться с источниками потенциальной опасности промышленных лазеров в процессе их эксплуатации;

♦ ознакомиться с правилами техники безопасности при работе с лазерными устройствами и возможными средствами защиты.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Источники опасности лазерного излучения

Основную опасность лазерное излучение представляет для глаз человека.

В диапазоне волн от 0,4 до 1,4 мкм глаз прозрачен, рис. 2.1, так что лазерное излучение фокусируется на сетчатке. При этом образуется фокальное пятно диаметром около 10 мкм, плотность мощности увеличивается примерно в 500000 раз (диаметр зрачка ~ 7 мм, увеличение плотности мощности составляет $(7 \cdot 10^3/10)^2$).

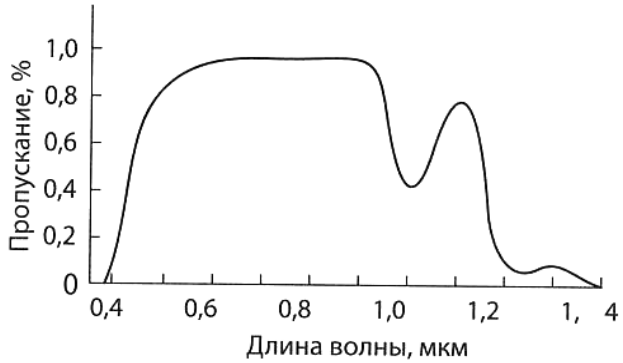


Рисунок 2.1 – Проницаемость человеческого глаза до сетчатки в зависимости от длины волны. Видимая область спектра составляет от 0,4 до 0,7 мкм

Т.о., в диапазоне от 0,4 до 1,4 мкм лазерное излучение чрезвычайно опасно, даже небольшие мощности ~ 1 мВт при неблагоприятных условиях могут привести к повреждению сетчатки.

Особую осторожность следует проявлять в случае невидимого света.

В *инфракрасных областях* (свыше 1,4 мкм) излучение активно поглощается тканевой жидкостью, поэтому лучи проникают в верхние слои роговицы. Предельные значения с точки зрения опасности для глаз здесь выше, поскольку отпадает фокусировка через хрусталик.

В *ультрафиолетовых областях* спектра имеет место сильное поглощение в роговице. Предельные значения в данном случае довольно низкие, однако причиняемый вред носит аккумулятивный характер, даже незначитель-

ное облучение в течение длительного времени может стать причиной тяжелого заболевания.

2.2. Предельные показатели безопасности лазерных устройств в соответствии с международными нормами

В отношениии эксплуатации лазеров действуют европейские нормы «Безопасность лазерных устройств *DIN EN* 60 825-1». Одновременно Союзом промышленников и предпринимателей разработаны собственные правила техники безопасности «Лазерное излучение *BVG B2(VBG 93*)».

Согласно установленным нормам существуют предельные показатели безопасности лазеров для глаз.

Максимально допустимая величина облучения зависит от длины волны и продолжительности облучения. Значения максимально допустимой величины облучения в случае воздействия одиночных импульсов представлены в табл. 2.1, на рис. 2.2.

Таблица 2.1 – Значения максимально допустимой величины облучения роговицы глаза по нормам *BVG B2 (VBG 93)*

Диапазон длин волн, нм	Длительность импульсов, с	Плотность мощности, Вт/м^2	Длительность импульсов, с	Плотность мощности, Вт/м^2	Длительность импульсов, с	Плотность мощности, Вт/м^2
180…315	≥ 30000	0,001	$< 10^{-9}$	$3\cdot10^{10}$	10^{-9} … $3\cdot10^{-4}$	10^{9}…10^{5}
315…1400	$>5\cdot10^{4}$ … 10	10	$< 10^{-9}$	$5\cdot10^{6}$	10^{-9} … $5\cdot10^{-4}$	10^{6}…10^{4}
1400…10^{6}	>0,1 … 10	1000	$< 10^{-9}$	10^{11}	10^{-9} … 0,1	10^{12}…10^{8}

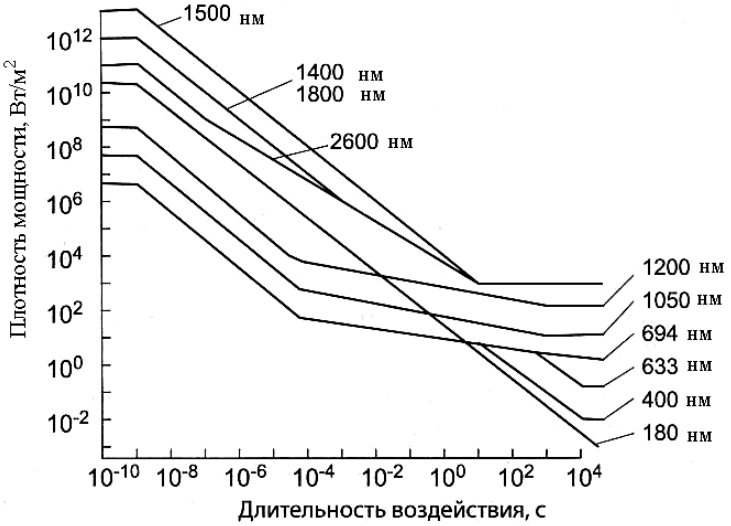


Рисунок 2.2 – Максимально допустимое облучение роговицы глаза при некоторых выборочных длинах волн по *DIN EN* 60 825-1

При определении плотности мощности и плотности энергии средние значения должны быть получены на основе площадей круга со следующими диаметрами : D = 1 мм (λ = 180…315 нм); D = 7 мм (λ = 315…1400 нм); D = =10 мм (λ = 1400…10^4 нм).

2.3. Классы лазеров и потенциал опасности

В зависимости от потенциальной опасности лазеры делят на классы 1, 1M, 2, 2M (символ «M» – от англ. *magnification* – усиление), 3R (символ «R» - от англ. *relaxation* – ослабление), 3B и 4, табл. 2.2. Отнесение лазера к тому или иному классу определяется не только длиной волны, но и временем, в течение которого осуществляется излучение.

Таблица 2.2 – Классы лазеров и их потенциальная опасность

Класс	Опасность
1	Доступное лазерное излучение опасности не представляет
1M	Лазерное излучение не опасно, пока не используются оптические инструменты (светодиоды, системы с коллимированными лучами большого поперечного сечения)
2	Этот класс определен только в видимой области спектра. Лазеры данного класса при облучении до 0,25 с (рефлекторное смыкание век) не опасны. Предельная мощность 1 мВт
2M	Этот класс определен только в видимой области спектра. Лазерыв данного класса при облучении до 0,25 с (рефлекторное смыкание век) не опасны, если не используются оптические инструменты
3R	В видимой области спектра выходные значения (при времени облучения до 0,25 с) в 5 раз выше, чем у лазера класса 2 (5 мВт). В видимой области выходные значения при времени облучения до 100 с в 5 раз выше, чем у лазера класса 1
3B	Доступное лазерное излучение опасно для глаз, а в особых случаях и для кожи. Верхний предел мощности составляет 0,5 Вт
4	Лазерное излучение опасно для глаз и для кожи. Опасность может представлять и диффузно рассеянное излучение. Излучение лазеров данногго класса способно вызвать пожары и взрывы

2.4. Средства защиты и основные правила техники безопасности

Пространство, в котором превышаются максимально допустимые величины облучения, называют *«зоной лазерного излучения»*. Над входом в опасное с этой точки зрения помещение должны быть установлены таблички с соответствующим предупреждением либо сигнальные лампы.

В случае лазеров класса 3B и 4 дополнительно предусматривается ограждение.

К индивидуальным средствам защиты относят специальные очки, которые должны носить все лица, подвергающиеся потенциальной опасности со стороны лазерного излучения.

Лазерные защитные очки должны соответствовать нормам *DIN EN* 207. Их классифицируют в зависимости от присвоенной им степени защиты L1… L10; цифра указывает оптическую плотность.

Связь между степенью защиты и характеристиками лазеров приведена в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Определение степени защиты лазерных защитных очков в зависимости от характеристик лазеров

Степень защиты	Максимальный коэффициент спектрального пропускания	Максимальная плотность мощности в диапазоне длин волн					
		180…315 нм		315…1400 нм		1400…10000 нм	
		Режим работы лазера					
		Непрерывный	Импульсный	Непрерывный	Импульсный	Непрерывный	Импульсный
		q, Вт/м^2	q, Вт/м^2	q, Вт/м^2	q, Вт/м^2	q, Вт/м^2	q, Вт/м^2
L1	10^{-1}	10^2	0,01	10^2	0,05	10^4	10^3
L2	10^{-2}	10^3	0,1	10^3	0,5	10^5	10^4
L3	10^{-3}	10^4	1	10^4	5	10^6	10^5
L4	10^{-4}	10^5	10	10^5	50	10^7	10^6
L5	10^{-5}	10^6	10^2	10^6	$5\cdot10^2$	10^8	10^7
L6	10^{-6}	10^7	10^3	10^7	$5\cdot10^3$	10^9	10^8
L7	10^{-7}	10^8	10^4	10^8	$5\cdot10^4$	10^{10}	10^9
L8	10^{-8}	10^9	10^5	10^9	$5\cdot10^5$	10^{11}	10^{10}
L9	10^{-9}	10^{10}	10^6	10^{10}	$5\cdot10^6$	10^{12}	10^{11}
L10	10^{-10}	10^{11}	10^7	10^{11}	$5\cdot10^7$	10^{13}	10^{12}

На лазерных защитных очках обязательно должны быть указаны степень защиты, длина волны и режим генерации лазера.

Дополнительно нормами *EN* 208 предусмотрены также специальные очки для юстировки лазеров.

Правила техники безопасности при работе на лазерных установках определены в соответствии с документом «Лазерное излучение *BVG B2(VBG 93)*».

3. ХОД ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с источниками опасности лазерного излучения для человека и необходимыми мерами защиты.
2. Рассмотреть предельные показатели безопасности лазерных устройств

в соответствии с международными нормами.

3. По табл. 3.1, 3.2 выбрать заданный тип лазера и его основные характеристики.
4. С учетом п. 2.2 рассчитать плотность мощности q данного типа лазера.
5. По табл. 2.3 выбрать рекомендуемое защитное средство (лазерные защитные очки).
6. Определить значение плотности мощности, пропускаемой данным защитным средством.
7. Сопоставить полученные данные с максимально допустимыми величинами по нормам *BVG B2(VBG 93*).

Таблица 3.1 – Исходные данные для выбора лазерных защитных очков

№ варианта	Тип активного вещества лазера	Режим работы	Средняя мощность *P*,Вт
1,16	$Cr:Al_2O_3$	Импульсный	6,8
2,17	$Ti:Al_2O_3$	Импульсный	92
3,18	$Ti:Al_2O_3$	Непрерывный	92
4,19	Nd-*YAG*	Непрерывный	33
5,20	Лазер на стекле с Nd	Непрерывный	10
6,21	CO_2	Непрерывный	12
7,22	CO_2	Импульсный	12
8,23	He-Ne	Непрерывный	0,05
9,24	He-Cd	Непрерывный	0,008
10,25	Cu	Непрерывный	36
11,26	Au	Импульсный	6,5
12,27	InGaAsP	Непрерывный	0,01
13,28	GaAlAs	Непрерывный	1,0
14,29	Лазер на эксимере F_2	Непрерывный	7,4
15,30	Лазер на эксимере XeCl	Непрерывный	28,5

Таблица 3.2 Длины волн промышленных лазеров

Тип активного вещества лазера	Длина волны λ, мкм
CO_2	10,6
Nd-*YAG*	1,06
Лазер на стекле с Nd	1,06
GaAlAs	0,75
$Ti:Al_2O_3$	0,70
$Cr:Al_2O_3$	0,694
InGaAsP	0,635
He-Ne	0,632
Au	0,628
Cu	0,578
He-Cd	0,325
Лазер на эксимере XeCl	0,308
Лазер на эксимере F_2	0,152

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Предельные показатели безопасности промышленных лазеров.
3. Классы лазеров в зависимости от потенциальной опасности.
4. Выбор индивидуального средства защиты на основе исходных данных.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные последствия воздействия лазерного излучения на человека.
2. Какие виды вредного воздействия лазерного излучения возможны при использовании лазеров различного типа (разных длин волн)?
3. Каково воздействие лазерного излучения на глаза человека?
4. Какими международными документами регламентируют безопасность лазерных устройств?
5. Каковы предельные показатели безопасности лазеров?
6. Какие классы лазеров различают в зависимости от потенциала опасности?
7. Какие средства защиты предусмотрены при работе на лазерных установках?
8. На основании каких характеристик лазера выбирают защитные лазерные очки?
9. Каков основной параметр лазерных защитных очков, определяющий их степень защиты?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко В.С. Прогрессивные методы лазерной обработки материалов / В.С. Коваленко. – К.: Вища шк., 1985.
2. Коваленко В.С. Лазерная технология: учеб. / В.С. Коваленко. – К.: Вища шк., 1989.
3. Брюннер В. Справочник по лазерной технике / В. Брюннер, К. Джанг: пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: учеб. пособие / Верезуб Н.В., Весткемпер Е., Внуков Ю.М. и др.; под ред А.И. Грабченко. – Х.: ХГПУ, 1999.
5. Фетисов М.Г. Материаловедение и технология металлов: учеб. / М.Г. Фетисов. – М.: Высш. шк., 2002.
6. Проблемы развития общества: культура, инновации, высокие технологии и экология: научное изд. / Гринева В.Н., Дудко П.Д., Крюк А.Г и др. – Харьков: Изд. ХГЭУ, 2003.
7. Черненко В.С. Променеві методи обробки: навч.посібник / В.С. Черненко, М.В. Кіндрачук, О.І. Дудка. – К.: Кондор, 2004.
8. Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий» / В.П. Вейко. – СПб:СПбГУИТМО, 2007.
9. Айхлер Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер: пер. с нем. – М.: Техносфера, 2008.
10. Пупань Л.И., Кононенко В.И. Перспективные технологии получения и обработки материалов: Учеб. пособие – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008.
11. Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие / Грабченко А.И., Внуков Ю.Н., Доброскок В.Л., Пупань Л.И., Фадеев В.А. под ред. А.И. Грабченко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2011.