

**Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Амурский государственный университет»**

Кафедра Физики

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ  
ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ**

Основной образовательной программы по специальности 010701.65 - Физика

Благовещенск 2012

УМКД разработан канд. физ.-мат. наук, доцентом Верхотуровой Ириной Владимировной

Рассмотрен и рекомендован на заседании кафедры

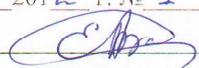
Протокол заседания кафедры от «21» 09 2012 г. № 1

Зав.кафедрой  И.А. Голубева

**УТВЕРЖДЕН**

Протокол заседания УМСС 010701.65 - Физика

от «10» 09 2012 г. № 1

Председатель УМСС  Е.А. Ванина

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Рабочая программа учебной дисциплины	4
2. Краткое изложение программного материала	13
3 Методические указания (рекомендации)	67
3.1 Методические указания для преподавателя	67
3.2 Методические указания для студентов	69
3.3 Методические указания по самостоятельной работе студента	70
4. Контроль знаний	73
4.1 Текущий контроль	
4.2 Итоговый контроль знаний	
5. Интерактивные технологии и инновационные методы, используемые в образовательном процессе.	74

## 1. Рабочая программа учебной дисциплины.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

**Целью освоения дисциплины** «Технология лазерной обработки» является формирование у студентов: знаний в области современных методов и средств лазерной технологии; умений проводить инженерные оценки и расчеты лазерных технологических процессов и систем; навыков постановки технологического процесса и грамотной эксплуатации лазерных технологических установок.

#### **Задачи дисциплины:**

1. Приобретение теоретических знаний и практических навыков по расчету технологических параметров обработки в зависимости от метода лазерной обработки и обрабатываемых материалов;
2. Приобретение навыков безопасной эксплуатации лазерных технологических установок.

### 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО:

Дисциплина «Технология лазерной обработки» ДС.Р.10 входит в раздел «Национально-региональный (вузовский) компонент» цикла «Дисциплины специализации». Знания, получаемые в ходе изучения данной дисциплины, могут быть полезны при выполнении научно-исследовательской работы и выпускной квалификационной работы студента.

Для освоения дисциплины необходимо знать:

- 1) курс Общей физики;
- 2) Физику лазеров;
- 3) элементы дисциплины «Математика»;
- 4) Квантовую физику;
- 5) Физику атомов и атомных явлений.

По завершению изучения дисциплины студент должен:

- **Знать** теоретические и экспериментальные проблемы технологии лазерной обработки и возможные пути их решения;
- **Уметь** проводить инженерные оценки и расчеты лазерных технологических процессов и систем;
- **Владеть** навыками постановки технологического процесса; навыками безопасной эксплуатации лазерных технологических установок .

### 3. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «Технология лазерной обработки»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 76 часов.

№ п/п	Модуль дисциплины	Виды учебной работы				Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра)  Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
		Лекции (час.)	Практические занятия (час.)	Лабораторные раб. (час.)	СРС (час.)	
1	Модуль 1 «Основные условия промышленного применения технологических лазеров»	2		14	3	Контроль посещений лекций.  Выполнение и защита лабораторных работ № 1-3, 7, 8.  Контролирующий тест по модулю.
2	Модуль 2 «Фокусировка лазерного излучения»	4		4	2	Контроль посещений лекций.  Выполнение и защита лабораторной работы №9.  Контролирующий тест по модулю.
3	Модуль 3 «Поверхностная лазерная обработка»	6		6	2	Контроль посещений лекций.  Выполнение и защита лабораторных работ № 4,5.  Контролирующий тест по модулю.
4	Модуль 4 «Лазерная сварка металлов»	6			2	Контроль посещений лекций.  Выполнение и защита лабораторной работы № 6.  Контролирующий тест по модулю.

5	Модуль 5 «Лазерная резка»	6		4	1	Контроль посещений лекций. Контролирующий тест по модулю.
6	Модуль 6 «Лазерное разделение материалов»	2			1	Контроль посещений лекций. Контролирующий тест по модулю.
7	Модуль 7 «Лазерная обработка пленочных материалов»	2			1	Контроль посещений лекций. Контролирующий тест по модулю.
8	Подготовка к зачету				8	
9	Итого	28		28	20	

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ И ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

##### 4.1 ЛЕКЦИИ

**Модуль 1 «Основные условия промышленного применения технологических лазеров»** Технологические особенности лазерного излучения (ЛИ). Требования к промышленным технологическим лазерам. Экономические аспекты и перспективы промышленного применения технологических лазеров. Основные требования по обеспечению безопасности при работе с технологическими лазерами.

**Модуль 2 «Фокусировка лазерного излучения»** Оптические системы, используемые в технологии лазерной обработки. Общие параметры расчета фокусирующих систем. Фокусировка ЛИ одиночными линзами. Применение эксцентрических линз при фокусировке ЛИ. Расчет параметров зеркальных объективов.

**Модуль 3 «Поверхностная лазерная обработка»** Анализ и классификация методов поверхностной лазерной обработки. Основные технологические лазеры, применяемые для поверхностной обработки. Закономерности образования структуры сплавов при лазерной термообработке поверхности. Структура и строение поверхностных слоев различных сталей после лазерной термообработки. Структура и строение зоны лазерного воздействия титановых сплавов, при лазерной закалке. Структура и строение зоны лазерного воздействия алюминиевых и магниевых сплавов, при лазерной закалке. Различные схемы импульсного лазерного упрочнения поверхностей. Основные параметры лазерной закалки непрерывным ЛИ и характеристики упрочненной поверхности. Технологические схемы закалки непрерывным ЛИ. Способы регулирования, распределения плотности мощности, по пятну при закалке непрерывным ЛИ. Примеры применения лазерной закалки в машиностроении; Лазерный отжиг. Лазерный отпуск. Получение поверхностных покрытий при помощи лазерного излучения. Лазерное легирование неметаллическими компонентами. Легирование металлическими соединениями. Технологические особенности лазерной наплавки. Свойства сплавов, направленных с помощью лазерного излучения, и перспективы лазерной наплавки. Примеры применения лазеров для поверхностной обработки. Ударное воздействие. Лазерное напыление покрытий. Лазерная маркировки, очистка поверхностей.

**Модуль 4 «Лазерная сварка металлов»** Особенности процесса лазерной сварки. Источники ЛИ. Теплофизические показатели лазерной сварки. Тепловые процессы. Методы лазерной сварки и их физические особенности. Классификация методов лазерной сварки. Преимущества и особенности процесса лазерной сварки. Физические особенности образования сварного шва при сварке материалов малых и больших толщин. Основы технологии лазерной сварки. Основные элементы оборудования для лазерной сварки. Фокусирующие системы. Лазерная сварка материалов малых толщин. Лазерная сварка металлов с глубоким проплавлением. Лазерная сварка различных конструкционных материалов. Сварка сталей. Сварка алюминиевых и магниевых сплавов. Сварка титановых сплавов. Сварка никелевых сплавов.

**Модуль 5 «Лазерная резка»** Механизмы газолазерной резки металлов. Физические процессы при лазерной резке металлов. Резка металлов в струе кислорода. Закономерности лазерной резки металлов непрерывным излучением. Закономерности лазерной резки металлов импульсно-периодическим излучением. Технологические закономерности процесса газолазерной резки (ГЛР) металлов. Параметры и показатели процесса ГЛР. Влияние энергетических параметров. Качество резки различных материалов. Влияние оптических параметров. Динамика вспомогательного газа при лазерной резке.

**Модуль 6 «Лазерное разделение материалов»** Физико-химические основы разделения материалов. Термическое действие лазерного излучения. Стадии лазерного разрушения неметаллических материалов. Механизмы лазерного разделения материалов. Технологические параметры и показатели процесса. Энергетический баланс процесса лазерного разделения неметаллов. Технологические процессы лазерного разделения с использованием непрерывного ЛИ. Лазерная резка. Лазерное термораскалывание хрупких материалов.

**Модуль 7 «Лазерная обработка пленочных материалов»** Физические основы лазерной обработки пленочных элементов. Нагревание пленок под действием ЛИ. Термохимическое действие ЛИ. Механизмы локального удаления пленок под действием ЛИ. Технологические процессы лазерной обработки пленок. Размерная обработка тонких пленок. Подгонка электрических параметров пленочных элементов.

## **4.2 ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ**

Предлагается список лабораторных работ. Преподаватель составляет график выполнения работ для каждой бригады (2 человека).

1. Техника безопасности при эксплуатации лазерных установок (2 часа);
2. Изучение устройства, принципа работы и характеристик твердотельного импульсного лазера типа ЛТУ «Квант 15» (4 часа);
3. Определение предельно допустимого уровня лазерного излучения при воздействии на глаза и кожу (2 часа);
4. Термоупрочнение металлов импульсным лазерным излучением (4 часа);
5. Упрочнение сталей комбинированной обработкой (4 часа);
6. Лазерная сварка (4 часа);
7. Изучение устройства, принципа работы, технико-эксплуатационных параметров и характеристик твердотельного непрерывного лазера типа ЛТН-103 (2 часа);
8. Изучение устройства, технико-эксплуатационных параметров и характеристик непрерывного лазера ЛГН-111(типа «Шатл») (2 часа);
9. Фокусировка лазерного излучения одиночными линзами (4 часа).

## 5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ

№ п/п	№ раздела (темы) дисциплины	Форма (вид) самостоятельной работы	Трудоемкость в часах
1	Модуль 1 «Основные условия промышленного применения технологических лазеров»	Подготовка отчетов по выполнению лабораторных работ № 1-3, 7, 8. Конспекты по темам. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	3
2	Модуль 2 «Фокусировка лазерного излучения»	Подготовка отчета по выполнению лабораторной работы №9. Конспекты по темам. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	2
3	Модуль 3 «Поверхностная лазерная обработка»	Подготовка отчетов по выполнению лабораторных работ № 4,5. Конспекты по темам. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	2
4	Модуль 4 «Лазерная сварка металлов»	Подготовка отчета по выполнению лабораторной работы № 6. Конспекты по темам. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	2
5	Модуль 5 «Лазерная резка»	Конспекты по темам. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	1
6	Модуль 6 «Лазерное разделение материалов»	Конспекты по темам. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	1
7	Модуль 7 «Лазерная обработка пленочных материалов»	Конспекты по темам. Подготовка к контролируемому тесту по модулю.	1
8	Подготовка к зачету		8

## **6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

При чтении лекций по данной дисциплине используется такой неимитационный метод активного обучения, как «Проблемная лекция». Где перед изучением модуля обозначается проблема, на решение которой будет направлен весь последующий материал модуля.

При выполнении работ используются следующий прием интерактивного обучения «Кейс-метод»: задание студентам для подготовки к выполнению лабораторной работы имитирующей реальное событие; обсуждение с преподавателем цели работы и хода выполнения ее выполнения; обсуждение и анализ полученных результатов; обсуждение теоретических положений, справедливость которых была установлена в процессе выполнения лабораторной работы.

## **7. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ**

### **7.1 Контролирующий тест**

Контролирующий тест проводится по темам соответствующих модулей. В каждом тестовом задании от 7 до 10 заданий. Тест выявляет теоретические знания, практические умения и аналитические способности студентов.

### **7.2 Подготовка конспектов по темам на самостоятельное изучение**

*Модуль 1 «Основные условия промышленного применения технологических лазеров»* Экономические аспекты и перспективы промышленного применения технологических лазеров.

*Модуль 2 «Фокусировка лазерного излучения»* Применение эксцентрических линз при фокусировке ЛИ. Расчет параметров зеркальных объективов.

*Модуль 3 «Поверхностная лазерная обработка»* Структура и строение зоны лазерного воздействия титановых сплавов, при лазерной закалке. Структура и строение зоны лазерного воздействия алюминиевых и магниевых сплавов, при лазерной закалке. Примеры применения лазерной закалки в машиностроении. Примеры применения лазеров для поверхностной обработки.

*Модуль 4 «Лазерная сварка металлов»* Основные элементы оборудования для лазерной сварки. Фокусирующие системы. Сварка сталей. Сварка алюминиевых и магниевых сплавов. Сварка титановых сплавов. Сварка никелевых сплавов.

*Модуль 5 «Лазерная резка»* Технологические закономерности процесса газолазерной резки (ГЛР) металлов. Параметры и показатели процесса ГЛР. Влияние энергетических параметров. Качество резки различных материалов. Влияние оптических параметров. Динамика вспомогательного газа при лазерной резке.

*Модуль 6 «Лазерное разделение материалов»* Лазерное термораскалывание хрупких материалов.

*Модуль 7 «Лазерная обработка пленочных материалов»* Технологические процессы лазерной обработки пленок. Размерная обработка тонких пленок. Подгонка электрических параметров пленочных элементов.

### 7.3 Примерные зачетные вопросы

1. Лазерное оборудование и технологические комплексы. Схемы и конструкции технологических лазеров.
2. Лазерное оборудование: СЛТК, УЛК, комбинированные системы.
3. Перспективные направления технология лазерной обработки.
4. Основные требования по обеспечению безопасности при работе с технологическими лазерами.
5. Технологические газоразрядные CO<sub>2</sub>-лазеры (CO<sub>2</sub>-лазеры с диффузионным охлаждением рабочей смеси, CO<sub>2</sub>-лазеры с конвективным охлаждением рабочей смеси).
6. Технологические твердотельные лазеры с оптической накачкой (на гранте с неодимом, на стекле с неодимом).
7. Волоконные лазеры.
8. Диодные лазеры.
9. Свойства лазерного излучения.
10. Оптические системы, используемые в технологии лазерной обработки.
11. Общие положения расчета параметров фокусирующих систем.
12. Расчет параметров зеркальных объективов.
13. Фокусировка лазерного излучения одиночными линзами. Методика расчета фокусирующих систем. Оптические системы, используемые в технологии лазерной обработки.
14. Применение эксцентрических линз при фокусировке ЛИ.
15. Физические процессы при взаимодействии лазерного излучения с материалами: энергетические условия взаимодействия ЛИ при обработке материалов; плазменные процессы при лазерной обработке.
16. Физические процессы при взаимодействии лазерного излучения с материалами: тепловые процессы при лазерном воздействии.
17. Физические процессы при взаимодействии лазерного излучения с материалами: физическая модель процесса глубокого проплавления, математическая модель процесса глубокого проплавления и ее применение
18. Деформации и напряжения при лазерной обработке.
19. Особенности распределения остаточных деформаций и напряжений.
20. Технологическая прочность металлов при лазерной обработке.
21. Формирование и кристаллизация шва при лазерной сварке.
22. Теоретические и экспериментальные методы определения деформаций и напряжений.
23. Технологическая прочность металлов при лазерной обработке: горячие и холодные трещины.
24. Классификация и сущность методов лазерной обработки материалов.
25. Особенности фазовых переходов при лазерном нагреве железоуглеродистых сплавов.
26. Особенности образования структур в сталях при лазерном нагреве.
27. Особенности структуры, образовавшейся при большой скорости охлаждения.
28. Особенности формирования структуры сплавов при лазерной обработке с оплавлением поверхности.
29. Формирование эвтектики
30. Структура и строение поверхностных слоев сталей и чугунов после лазерной обработке.
31. Структура и механизмы упрочнения цветных металлов и сплавов. Свойства сплавов после лазерного воздействия.
32. Особенности образования твердых растворов
33. Образование метастабильных промежуточных фаз
34. Основные параметры импульсной лазерной закалки и характеристики упрочненной поверхности.
35. Основные параметры лазерной закалки непрерывными лазерами и характеристики упрочненной поверхности.

36. Факторы, влияющие на геометрические размеры зон лазерного воздействия.
37. Лазерный отжиг.
38. Лазерный отпуск.
39. Лазерное поверхностное легирование.
40. Лазерная наплавка.
41. Рекомендации по разработке технологического процесса лазерной наплавки.
42. Классификация способов лазерной сварки.
43. Технологические особенности лазерной сварки.
44. Физические процессы образования сварного соединения при сварке материалов малых толщин и с глубоким проплавлением.
45. Технология лазерной сварки металлов малых толщин и с глубоким проплавлением.
46. Сварка сталей.
47. Сварка алюминиевых и медных сплавов.
48. Сварка никелевых сплавов.
49. Сварка титановых сплавов.
50. Сварка керамических и композиционных материалов.
51. Особенности разделения материалов.
52. Технология лазерной резки неметаллических материалов.
53. Лазерная обработка хрупких материалов.
54. Технология газолазерной резки металлических материалов.
55. Резка неметаллических материалов: кварц, стекло, стеклотекстолит.
56. Лазерный отжиг, рекристаллизация и легирование полупроводников.
57. Лазерное нанесение тонких пленок и изменение химического состава поверхностных слоев деталей электронных приборов.
58. Лазерная обработка пленочных материалов.
59. Методы быстрого прототипирования с использованием лазерного излучения
60. Лазерная динамическая балансировка деталей.
61. Лазерная технология создания объемных изображений в стекле.
62. Лазерная пайка металла с керамикой.

#### **7.4 Критерии оценки при сдаче зачета**

1. К сдаче зачета допускаются студенты:

- посетившие все лекционные и лабораторные занятия данного курса;
- защитившие лабораторные работы.

При наличии пропусков темы пропущенных занятий должны быть отработаны. Программные вопросы к зачету доводятся до сведения студентов за месяц до зачета.

2. Критерии оценки:

Итоговая оценка знаний студентов должна устанавливать активность и текущую успеваемость студентов в течение семестра по данному предмету.

Оценка «зачтено» - ставится при 65 % правильных ответов на зачете и наличии всех защищенных лабораторных работ.

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «Технология лазерной обработки»

### а) основная литература:

1. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие: доп. Мин. обр. РФ/ А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров; под ред. А.Г. Григорьянца.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.- 664 с.

### б) дополнительная литература:

1. Лабораторный практикум по технологии лазерной обработки: учеб.-метод. пособие/ АмГУ, ИФФ; сост. И.В. Верхотурова [и др.].- Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2009.- 148 с.

2. Технология лазерной обработки: учеб-метод. комплекс для спец. 010701-физика/ АмГУ, ИФФ; сост. И.В. Верхотурова, Ю.А. Петраченко.- Благовещенск: Изд-во Амур. Гос. Ун-та, 2007.- 158 с.

### в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

№	Наименование ресурса	Краткая характеристика
1	<a href="http://www.iqlib.ru">http://www.iqlib.ru</a>	Интернет-библиотека образовательных изданий, в который собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия.
2	<a href="http://rucont.ru/">http://rucont.ru/</a>	Электронная библиотечная система, в который собраны электронные учебники, справочные и учебные пособия.

### г) периодические издания:

1. Материаловедение.
2. Упрочняющие технологии и покрытия.
3. Физика и химия обработки материалов.

## 9. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ «Технология лазерной обработки»

№ п/п	Наименование лабораторий, ауд.	Основное оборудование
1.	112	лазерная технологическая установка «Квант 15», измеритель энергии лазерного излучения ТИЭ-1, образцы Стали 45, металлические образцы, лазерная установка ЛТН-103, измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н, лазерная установка ЛГН-111, светолучевой станок, выполненный на базе станка ВП-910 М., осциллограф, приспособление для установки и фиксации образцов, обрабатываемые образцы, измерительный инструмент.
2	113 а	микротвердомер ПМТ-3, металлографический микроскоп ЛабоМет-И-1, наждачная бумага, шлифовальный станок.
3	116	электроэрозионная установка «Элитрон-22А».

## 2. Краткое изложение программного материала

### ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

#### ВВЕДЕНИЕ.

Целью данного курса является формирование у студентов знаний в области современных методов и средств лазерной технологии, умения проводить инженерные оценки и расчеты лазерных технологических процессов и систем. Сведения, полученные студентами при изучении данного курса, должны позволить поставить технологический процесс и грамотно эксплуатировать лазерные технологические установки.

Студенты изучают курс названной дисциплины с целью приобретения теоретических знаний и практических навыков по расчету технологических параметров в зависимости от метода лазерной обработки и обрабатываемых материалов, безопасной эксплуатации лазерных технологических установок.

Основные умения, приобретаемые студентами при изучении дисциплины:

- при проектировании технологического процесса лазерной обработки материалов студент должен уметь рассчитать режимы лазерной обработки,
- должен иметь некоторые навыки работы на лазерных технологических установках.

#### ***Модуль 1 «Основные условия промышленного применения технологических лазеров»***

*Технологические особенности лазерного излучения (ЛИ).* Лазерное излучение – это физический фактор, который в настоящее время не представляет такой опасности, как загрязнение воздуха химическими или радиоактивными веществами или генерация волн высоких или сверхвысоких частот. Однако имеется потенциальная опасность прямого и отраженного лазерного излучения для организма человека и в первую очередь для органов зрения. При эксплуатации лазерных установок наблюдаются сопутствующие опасные и вредные производственные факторы: излучение ламп накачки, электромагнитные поля, шумы, вредные химические вещества, выделяющиеся из лазерных установок и мишеней, рентгеновское излучение, плазменные явления и т.п. Таким образом, человек может подвергаться комбинированному воздействию различных опасных и вредных производственных факторов, которые вместе с лазерным излучением составляют гигиенический фон, в условиях которого происходит эксплуатация лазеров.

*Требования к промышленным технологическим лазерам. Экономические аспекты и перспективы промышленного применения технологических лазеров.* Развитие современного производства обуславливает все возрастающее внедрение наукоемких технологий. К ним относится лазерная обработка материалов. Такая обработка является одной из технологий, которые определяют современный уровень производства в промышленно развитых странах. Использование лазерной обработки материалов позволяет обеспечить высокое качество получаемых изделий, заданную производительность процессов, экологическую чистоту, а также экономию людских и материальных ресурсов.

В настоящее время применение лазерных технологий в машиностроительном производстве чрезвычайно разнообразно. К числу таких технологий относятся сварка, термоупрочнение, легирование, наплавка, резка, размерная обработка, маркировка, гравировка, прецизионная микросварка и многие другие. В некоторых случаях лучевые технологии находятся вне конкуренции, так как с помощью лазеров можно получить технические и экономические результаты, которых нельзя достичь другими техническими средствами.

Спектр оборудования, используемого для лазерной обработки материалов, чрезвычайно широк. Большинство производителей поставляют на рынок не отдельные

технологические лазеры, а лазерные технологические комплексы. В них имеются устройства внешней оптики, управляемые столы, манипуляторы, роботы для перемещения изделия во время обработки, а также программное обеспечение, необходимое для реализации конкретной технологии.

Среди лазерных источников, используемых для обработки материалов, наиболее широкое распространение получили высокоомощные CO<sub>2</sub>-лазеры. Их серийно выпускают в Европе, США, Японии и в России. Основным направлением развития и совершенствования лазеров этого типа является повышение их надежности и экономичности. Высокими темпами растет производство твердотельных лазеров. Они превосходят газовые по технологичности, экономичности, массе и габаритным размерам. Их существенным технологическим преимуществом является возможность применения для передачи излучения гибким световодом.

В последние годы фирмами Nuvonyx Inc. и Rofm-Sinar были разработаны и выпущены на рынок мощные диодные лазеры. Несмотря на то что их излучение еще не удается сфокусировать в пятно с размерами порядка долей миллиметра, их стали успешно применять в машиностроительных технологиях. На основе диодных лазеров уже созданы ЛТК для термообработки, сварки и резки, в том числе и с использованием волоконно-оптических систем передачи излучения.

Одним из последних достижений в области лазерных технологий стало создание мощных волоконных лазеров (до 20 кВт). Их использование позволяет получить различные временные характеристики излучения в спектральном диапазоне от 1 до 2 мкм. Область их применения весьма разнообразна: лазерная резка и сварка металлов, маркировка и обработка поверхностей, полиграфия и скоростная лазерная печать, лазерные дальнометры и трехмерные локаторы, аппаратура для телекоммуникаций, медицинские установки и т. д.

Промышленные технологические лазеры включают в свой состав следующие узлы (системы).

1. Активный элемент, предназначенный для обеспечения процесса генерации инверсно-заселенной рабочей средой.
2. Источник электропитания активного элемента.
3. Система охлаждения, гарантирующая большой ресурс работы лазера; она должна обеспечивать оптимальную температуру активной среды и достаточно низкую температуру узлов конструкции технологических лазеров.
4. Оптический резонатор с устройством вывода излучения, обеспечивающий высокие значения энергетической эффективности генерации излучения и оптического качества лазерного пучка.
5. Система передачи и фокусировки излучения.
6. Система автоматического управления технологическим лазером; она является подсистемой системы управления автоматизированного лазерного технологического комплекса и предназначена для обеспечения автоматического вывода технологического лазера на заданный режим генерации излучения, безаварийности и безопасности функционирования технологических лазеров, активной стабилизации параметров лазерного излучения и внутренних технологических параметров лазера, управления изменением мощности лазерного излучения во времени, необходимым для проведения процесса лазерной обработки изделий в автоматизированном технологическом комплексе.

Технологический лазер может быть исполнен как в виде моноблока с использованием всех перечисленных выше узлов, так и в виде отдельного блока генерации излучения (включающего в себя активный элемент, оптический резонатор и систему охлаждения) и различных агрегатных блоков, блоков питания и управления.

*Требования к промышленным технологическим лазерам.* Особенность лазерного оборудования состоит в том, что технологический лазер должен удовлетворять, во-первых, общим требованиям, предъявляемым к любому промышленному технологическому

оборудованию, а во-вторых, специфическим требованиям, предъявляемым при проведении конкретного лазерного технологического процесса.

Промышленные технологические лазеры должны обеспечивать следующие требования.

1. Необходимый уровень мощности, качество и стабильность излучения .
2. Минимальная стоимость 1 кВт энергии излучения.
3. Полный ресурс работы не менее  $10^4$  ч при не менее 90 %-ном времени работы оборудования с генерацией и использованием лазерного излучения.
4. Автоматическое управление мощностью и пространственным положением пучка, а также основными внутренними параметрами.
5. Санитарно-гигиеническая и экологическая безопасность эксплуатации.

Лазерный технологический комплекс (ЛТК) представляет собой технологическую установку, снабженную манипулятором изделия или оптики, вспомогательной технологической оснасткой и оборудованием для проведения технологических операций. При создании ЛТК можно использовать уже готовые, отработанные компоновки и конструкции, применяемые в станкостроении и робототехнике, что позволяет получить экономию при разработке ЛТК. Однако при этом следует учитывать специфику лазерного оборудования, его эксплуатационные особенности, предъявляемые к нему технические требования.

В промышленности применяют три вида ЛТК: специализированные, универсальные и автоматизированные.

Основными элементами, входящими в состав любого ЛТК, являются лазер, манипулятор изделия или оптики, внешний оптический тракт и система управления. В ЛТК обязательно обеспечение функциональных связей между системой управления лазером и системой управления манипуляторами. Основная функция таких связей состоит в синхронизации движения манипулятора и лазерного луча. В качестве источника излучения в зависимости от условий применения могут быть использованы газовые, твердотельные, волоконные или диодные лазеры.

Специализированный лазерный технологический комплекс (СЛТК) создают на основе одного отработанного технологического процесса, он предназначен для обработки одного типа деталей, что и определяет его конструкцию. С помощью СЛТК решают отдельные специальные задачи: их применяют на предприятиях, выпускающих ограниченную номенклатуру изделий крупными сериями.

УЛК используют при выполнении ряда операций или при обработке нескольких деталей в серийном и мелкосерийном производстве. В зависимости от типа и характера операций их подразделяют на:

- 1) одноцелевые (для осуществления однотипных операций, например для лазерной резки, гравировки, перфорации и т. д.);
- 2) многоцелевые, или универсальные (для выполнения различных операций с использованием универсальных манипуляторов, например для резки и сварки);
- 3) гибкие производственные системы (процесс обработки и движения деталей при смене операционного цикла в них автоматизирован);
- 4) комбинированные (для проведения лазерной обработки, например, лазер-пресс, лазер с дополнительным использованием плазменной резки, электрической дуги и т. д.).

*Основные требования по обеспечению безопасности при работе с технологическими лазерами.* Рассмотрим классификацию лазеров по степени опасности генерируемого ими излучения. По степени опасности лазеры подразделяются на следующие классы: 0-безопасные, 1-малоопасные, 2-средней опасности, 3-опасные, 4-высокой опасности.

К безопасным относятся такие лазеры, выходное излучение которых не представляет опасности для биологических тканей при воздействии на них.

К малоопасным относятся такие лазеры, эксплуатация которых связана с опасностью воздействия прямого и зеркально отраженного излучения только на глаза.

К лазерам средней опасности относятся такие лазеры, которые при эксплуатации создают опасность воздействия как на глаза, так и на кожу и работа которых сопровождается возникновением других опасных и вредных производственных факторов.

К лазерам высокой опасности относятся такие, в процессе эксплуатации которых наблюдаются все факторы, характерные для 1-3 классов, а также ионизирующее излучение с уровнем, превышающим установленные пределы.

Все вредные производственные факторы, сопутствующие работе на лазерные установках, можно условно разделить на два типа.

К первому типу относятся факторы, воздействующие в основном на отдельные органы, ко второму на весь организм.

Первый тип включает в себя лазерное излучение, аэродисперсные системы, вредные химические вещества и шум. Ко второму типу факторов относится вибрация, электромагнитные поля, повышенное напряжение, ионизирующее излучение, микроклиматические условия. Подробнее рассмотрим опасные и вредные производственные факторы, существующие при эксплуатации лазеров.

В зависимости от класса лазерных установок степень опасности указанных факторов различна.

Во всех случаях (для лазеров 1-4 классов) воздействие прямого лазерного излучения на части тела или глаза рассматривается как аварийный случай. То же самое относится к высокому напряжению.

При эксплуатации лазеров 2-4 классов в результате нагревания обрабатываемых материалов может повыситься температура окружающей среды и измениться ее влажность, что повлияет на окружающий микроклимат. По мере возрастания класса лазерных установок необходимо увеличивать степень контроля: полностью он производится для установок 4 класса.

Особое место при оценке степени безопасности при работе лазерных установок занимает оценка отраженного лазерного излучения. Наиболее опасен этот вид излучения для установок 2-4 класса. Опасность в первую очередь связана с отражательными свойствами обрабатываемого материала и с конструктивными особенностями установок.

Для обеспечения безопасной работы на лазерных установках используют различные средства снижения опасных и вредных производственных факторов. В зависимости от вида опасности применяют соответствующие средства.

Такие технологические операции, как сварка, резка, термообработка и другие связаны с опасностью поражения лазерным излучением. Способы защиты персонала от лазерного излучения подразделяются на коллективные и индивидуальные.

Коллективные средства защиты включают в себя:

- защитные экраны (или кожухи), препятствующие попаданию лазерного излучения на рабочие места; экраны по возможности должны поглощать излучение основной длины волны и оставаться прозрачными на остальном участке спектра;
- размещение пульта управления лазерной установкой (или всего технологического процесса) в отдельном помещении с телевизионной или другой системой наблюдения за ходом процесса;
- экранирование света импульсных ламп накачки и ультрафиолетового излучения газового разряда;
- системы блокировок и сигнализации, предотвращающие доступ персонала во время работы лазера в пределы лазерно-опасной зоны;
- окраску внутренних поверхностей помещений, а также находящихся в них предметов (за исключением специальной аппаратуры) в матовый цвет с минимальным коэффициентом отражения, обеспечивающим максимальное рассеяние света на длине волны излучения;
- перегородки из непроницаемого для лазерного излучения материала;
- экранировку открытого луча на пути от лазера к детали.

Лазерная зона, если она находится в помещении цеха, должна иметь ограждения с маркировкой соответствующими знаками. Доступ в эту зону посторонним лицам запрещается.

К индивидуальным средствам защиты от лазерного излучения относятся: очки, щитки, маски, технологические халаты и перчатки.

Средства индивидуальной защиты должны входить в комплекс мер, обеспечивающих безопасные условия труда, только в тех случаях, когда другие способы защиты (коллективные) не позволяют обеспечить безопасное ведение работ на лазерных установках.

Защиту глаз от лазерного излучения осуществляют с помощью очков со специальными светофильтрами.

Светофильтры выполнены на основе поглощающих стекол или пластмасс, диэлектрических тонкопленочных отражателей, комбинированных, состоящих из поглощающих стекол и диэлектрических тонкопленочных отражателей.

Поглощающие стекла и пластмассы наиболее употребительны, дешевы и на некоторой длине волны поглощают до 90% подающей на них световой энергии. На наружной стороне поглощающего фильтра устанавливают дополнительно тонкопленочные отражатели, препятствующие разрушению фильтров при поглощении лазерного излучения и нагреве.

Комбинированные многослойные светофильтры являются наилучшими и состоят из отражающих зеркал и поглощающих материалов.

Светофильтры противолазерных очков снижают интенсивность излучения до безопасной величины и не изменяют своих свойств при попадании на них прямого лазерного излучения. Форма очков и оправы исключает возможность попадания лазерного излучения сквозь щели между оправой и лицом.

## ***Модуль 2 «Фокусировка лазерного излучения»***

*Оптические системы, используемые в технологии лазерной обработки.* Для успешной реализации любого технологического процесса лазерной обработки необходима разработка соответствующей оптической системы, являющейся важным элементом современной лазерной установки. Под оптической системой в широком смысле слова следует понимать оптический резонатор лазера, фокусирующую, управляющую оптику и другие оптические элементы системы преобразования параметров лазерного луча.

Система зеркал, расположенная определенным образом и обеспечивающая существенное увеличение эффективной длины активной среды в результате многократного отражения излучения между зеркалами, называется оптическим резонатором.

В ранних конструкциях твердотельных технологических лазеров были использованы оптические резонаторы с плоскопараллельными зеркалами. Однако в таком резонаторе имеют место большие дифракционные потери, и лазерное излучение на выходе из него характеризуется нестабильностью энергетических параметров. В современных оптических резонаторах, как правило, применяют сферические зеркала или комбинации сферического и плоского зеркал.

В современных лазерах используют как устойчивые, так и неустойчивые резонаторы. В ряде случаев, особенно в лазерах с оксидом или диоксидом углерода в качестве активной среды, иногда предпочтительней применять неустойчивые резонаторы. Следует отметить, что световой пучок на выходе из такого резонатора имеет кольцеобразное поперечное сечение.

Расходимость лазерного излучения может быть вызвана несколькими причинами: дифракцией луча на выходной апертуре резонатора, оптической неоднородностью рабочей среды лазера, деформацией зеркал резонатора и др. Дифракционную расходимость можно рассчитать, тогда как расходимость, обусловленную другими кроме перечисленных выше причинами, чаще всего определяют экспериментально.

Расходимость лазерного пучка сплошного круглого сечения принято определять по угловому радиусу первого минимума дифракционной картины. В соответствии с этим половинный угол расходимости

$$W_{0,838} = 1.22\lambda / D$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения;  $D$  — диаметр луча.

Физический смысл формулы состоит в том, что в световом конусе с таким углом при вершине распространяется 83,8 % общей мощности излучения.

Расходимость излучения для неустойчивого телескопического резонатора, часто используемого в конструкциях современных технологических лазерах:

$$W_{0,838} \cong 1.2\lambda / t$$

где  $t = (D - d_B) / 2$

Лазерное излучение, полученное на выходе из резонатора, как правило, нельзя непосредственно использовать для технологических целей, так как оно не обеспечивает высокой степени концентрации энергии, требуемой для проведения того или иного процесса, заданного характера распределения плотности мощности в пучке излучения и других выходных характеристик. Для реализации высокопроизводительных процессов лазерной обработки, достижения высокого качества технологии и удобства эксплуатации лазерных установок в производстве применяют различные оптические системы преобразования параметров лазерного излучения.

Схема обработки неподвижных деталей по любому заданному контуру в простейшем случае реализуется с помощью двух подвижных зеркал. Плоские зеркала 2 и 3 перемещаются линейно при их неизменном угловом положении. Зеркало 2 движется вдоль оси выходящего из лазера 1 луча, а зеркало 3 — вдоль оси луча, отраженного от зеркала 2. Фокусирующая система 4 и зеркало 3 перемещаются синхронно с зеркалом 2. Изменение положения луча можно также задать и колеблющимися зеркалами без их линейного перемещения. В этом случае зеркала колеблются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

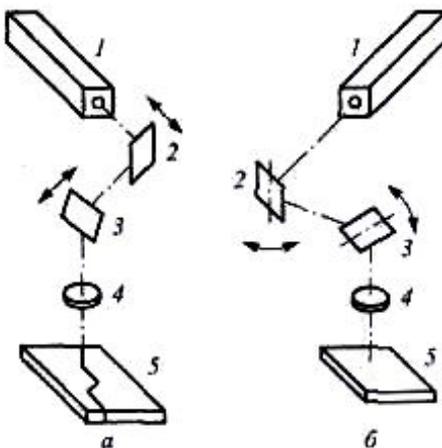
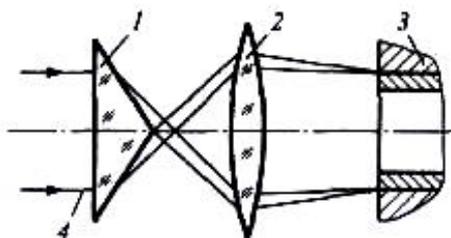


Схема перемещения луча двумя зеркалами:

*a* — перемещением зеркал; *б* — угловыми поворотами зеркал; 1 — лазер; 2,3 — плоские зеркала; 4 — фокусирующая система; 5 — обрабатываемая деталь

Для сварки кольцевых швов на плоскости предлагается применять аксиконы в виде прозрачных конусов, обращенных основанием к лучу, или экраны с кольцевым отверстием, преобразующие излучение сплошного сечения в кольцевое излучение. Полученное таким образом кольцевое излучение далее проходит через фокусирующую систему для увеличения

концентрации энергии путем уменьшения ширины кольца излучения, что создает на свариваемом изделии кольцевое распределение энергии. Сварка деталей может быть выполнена за один импульс без перемещения луча или деталей.



Преобразование излучения сплошного круглого сечения в излучение кольцевого сечения:

1 — аксикон; 2 — фокусирующая линза; 3 — деталь; 4 — лазерный луч

Следует отметить, что в технологических лазерах с неустойчивым резонатором, где лазерное излучение имеет кольцевое сечение, нет необходимости в применении аксиконов или экранов с кольцевыми отверстиями.

Лазерное излучение легко поддается регулированию и управлению путем его разделения на несколько частей с помощью простых оптических устройств. Это свойство излучения можно эффективно использовать при осуществлении подогрева околошовной зоны в целях уменьшения скорости охлаждения в процессе сварки, подогрева шва или наплавленного металла сразу после осуществления сварки для проведения местного отпуска и в других целях. Известна простая система для разделения лазерного луча с помощью фокусирующей линзы с центральным отверстием. Часть лазерного луча 2 беспрепятственно проходит через отверстие 1 в фокусирующей линзе 3 к свариваемой детали 4 и образует на соединяемых кромках детали круглое пятно нагрева с низкой плотностью энергии, достаточной для осуществления подогрева.

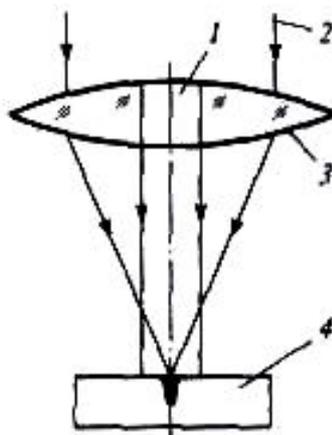


Схема для сварки с подогревом околошовной зоны:

1 — отверстие в фокусирующей линзе; 2 — лазерный луч; 3 — фокусирующая линза; 4 — деталь

Лазерный луч можно разделить с помощью устройства, выполненного на основе конструкции осесимметричного обращенного объектива Кассегрена. Лазерный луч 1 отражается от выпуклого зеркала 2 и попадает на два кольцевых вогнутых зеркала 4 и 5, имеющих различные фокусные расстояния. Часть излучения, попавшего на внутреннее зеркало 5, фокусируется на малое пятно в целях получения высокой концентрации энергии для обработки детали 3. Фокусное расстояние внешнего зеркала 4 больше, чем внутреннего;

с помощью этого зеркала осуществляется фокусировка лазерного излучения в виде кольцевого сечения. Плотность энергии такого излучения должна быть достаточной для подогрева свариваемых кромок и достижения требуемых скоростей охлаждения шва и околошовной зоны. Температура подогрева и скорость охлаждения регулируются перемещением внешнего зеркала 4 в направлении оси излучения.

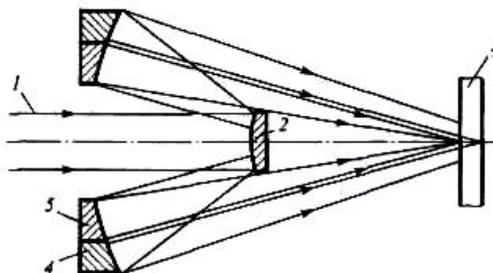
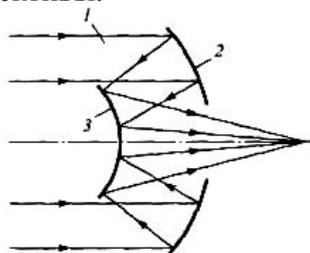


Схема устройства для сварки с подогревом с помощью осесимметричного обращенного объектива Кассегрена:

1 — лазерный луч; 2 — выпуклое зеркало; 3 — деталь; 4, 5 — вогнутые зеркала

Зеркальные фокусирующие системы используют в виде одиночного фокусирующего зеркала или какого-либо варианта двухзеркального объектива Кассегрена.

Перспективными при фокусировке мощного лазерного излучения для технологических целей являются двухзеркальные объективы.



Классическая схема двух-зеркального объектива Кассегрена.

1 — лазерный луч; 2 — параболическое вогнутое зеркало; 3 — гиперболическое выпуклое зеркало

Более приемлемой для лазерной обработки является схема фокусировки с помощью обращенного внеосевого объектива Кассегрена. В этой схеме экранирование излучения отсутствует и вся энергия излучения независимо от ее распределения по сечению достигает обрабатываемой поверхности.

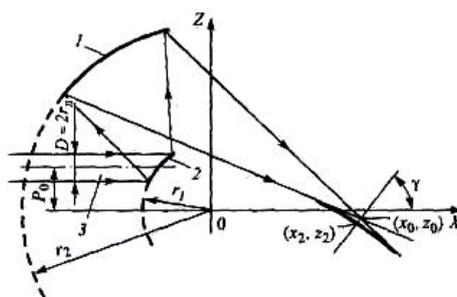


Схема фокусировки лазерного излучения обращенным внеосевым объективом Кассегрена: 1 — большое вогнутое сферическое зеркало; 2 — малое выпуклое сферическое зеркало; 3 — лазерный луч

Зеркальную оптику для мощных технологических лазеров обычно производят из чистой

меди, что обеспечивает высокие коэффициенты отражения и теплопроводности. Металлические зеркала изготавливают достаточно массивными и жесткими, чтобы они могли выдерживать высокий уровень лазерного излучения, не допуская значительных тепловых деформаций поверхности.

Просты и дешевы в изготовлении линзы из монокристаллов КС1. Они имеют небольшие показатели преломления, обеспечивают малые потери на отражение и используются без покрытия. Существенными недостатками этих материалов являются их гигроскопичность, низкая прочность и малая стойкость.

*Общие параметры расчета фокусирующих систем. Фокусировка ЛЛ одиночными линзами.* Параметры фокусирующих систем рассчитывают на основе законов оптики. Следует различать физическую и геометрическую оптику. В физической оптике рассматривается волновая природа света и изучаются свойства последнего (монокromaticность, интерференция, когерентность, поляризация и др.). В геометрической оптике изучение различных закономерностей проводят на основе представления светового луча как направления распространения энергии. Расчеты в геометрической оптике выполняют на основе законов прямолинейного и независимого распространения луча света, преломления и отражения.

Важным понятием, крайне необходимым для установления закономерностей прохождения излучения в оптических системах, является аберрация. Под аберрацией понимают погрешность изображения в оптической системе, вызванную отклонением луча от направления идеальной оптической системы. Это означает, что если в оптическую систему направить гомоцентрический пучок лучей, то из-за аберрации оптической системы на ее выходе можно получить негомоцентрический пучок. После преломления или отражения уже на первой поверхности линзы гомоцентричность в общем случае нарушается.

Основные представления геометрической оптики наглядно демонстрируются на схеме прохождения луча через линзу. Входной луч проходит на высоте  $h_1$  параллельно оси линзы ( $\gamma_1 = 0$ ). Линза, изготовленная из материала с коэффициентом преломления  $n$ , имеет толщину  $d_{\text{л}}$  и радиусы кривизны поверхностей  $r_1$  и  $r_2$ .

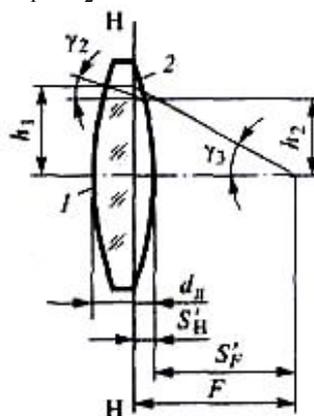


Схема прохождения луча через линзу (Н—Н — главная плоскость линзы)

Для тонкой линзы, когда расстояние между вершинами поверхностей толщина линзы, значительно меньше радиусов кривизны поверхностей. Тогда формула расчета оптической силы линзы определяется:

$$\Phi = 1/F = (n-1)(1/r_1 - 1/r_2)$$

Важным свойством лазерного излучения является монохроматичность, показывающая, что при фокусировке лазерного луча хроматические аберрации, возникающие вследствие зависимости показателя преломления от длины волны, отсутствуют. Это позволяет в дальнейшем рассматривать лишь монохроматические аберрации.

Для определения aberrаций оптической системы в общем случае необходимо рассчитать ход лучей по законам преломления и отражения и вычислить координаты точек их пересечения с фокальной плоскостью. Разность координат точек пересечения лучей с фокальной плоскостью и точки идеального изображения в параксиальных лучах определяют значения aberrаций.

Из теории aberrации можно получить формулу для расчета поперечной сферической aberrации в случае, когда лазерное излучение является параллельным пучком лучей, имеющих сечение круглой формы, и главная плоскость фокусирующей системы перпендикулярна оси лазерного излучения:

$$\delta q' = \sum_{k=1}^k \frac{P_k (D/2)^3}{2F^2}$$

где  $k$  – номер оптической поверхности;  $D$  – диаметр исходного лазерного излучения;  $F$  – фокусное расстояние линзы.

Таким образом, с помощью формул теории aberrаций третьего порядка можно рассчитать размеры фокального пятна, а следовательно, и концентрацию энергии в сфокусированном луче.

При расчете размера фокального пятна  $d_{\Pi}$  следует учитывать, что он складывается из составляющей  $d_w$ , обусловленной расходимостью, и составляющей  $d_a$ , вызванной aberrациями:

$$d_{\Pi} = d_w + d_a$$

В свою очередь составляющую  $d_w$  определяют по формуле:

$$d_w = WF$$

Составляющую  $d_a$  можно найти по выражению

$$d_a = \delta q' / 2.$$

В большинстве случаев лазерную обработку осуществляют с использованием в качестве фокусирующей оптики одиночных линз, устанавливаемых коаксиально с лазерным излучением. При этом главную плоскость фокусирующей линзы располагают перпендикулярно оси лазерного излучения. Вычисление aberrационной составляющей размера фокального пятна сводится к расчету сферической aberrации (2.3). Данная формула определяет величину поперечной aberrации, удвоенное значение которой составляет диаметр фокального пятна  $d_a$ , обусловленного aberrацией:

$$d_a = P^* D^3 / (32F^2)$$

$$P^* = \left( \frac{\alpha_2}{1/n - 1} \right)^2 \frac{\alpha_2}{n}, \alpha_2 = 1/(n(1 - C)), C = r_1 / r_2$$

Диаметр фокального пятна  $d_a$ , обусловленного aberrацией

$$d_a = P^* D^3 / (32F^2)$$

Анализ формулы позволяет сделать еще один важный вывод о том, что aberrации существенно зависят от диаметра лазерного луча. В лазерных установках малой мощности излучение генерируется пучками незначительных поперечных сечений в соответствии с формулой, при фокусировке таких излучений aberrации невелики. В современных же технологических установках большой мощности диаметр лазерного излучения во много раз больше и составляет десятки миллиметров, в результате чего aberrационные характеристики фокусирующих систем приобретают важное значение.

Соотношение для расчета минимально возможного в данных условиях размера фокального пятна:

$$d_{\Pi \min} = 0.67D(P^*)^{1/3} (\epsilon\lambda / t)^{2/3}$$

Анализируя формулу, можно найти некоторые пути дополнительного уменьшения минимального диаметра фокального пятна  $d_{\Pi \min}$ . Основной из них состоит в использовании фокусирующих систем с пониженными aberrациями. Кроме того, для уменьшения  $d_{\Pi \min}$ , следует уменьшать диаметр излучения  $D$ . Естественно, что этого необходимо достигать не

путем установки диафрагм, когда одновременно с уменьшением диаметра мощность излучения снижается, а, например, путем уменьшения диаметра излучения с помощью телескопической системы. Однако при этом расходимость излучения возрастает. Поэтому при уменьшении диаметра  $D$  в  $m$  раз минимальный размер фокального пятна уменьшится приблизительно в  $m^{1/3}$  раза, т. е. эффект увеличения концентрации энергии будет незначительным.

*Применение эксцентрических линз при фокусировке ЛИ.* В тех случаях, когда линза установлена относительно луча неточно, возникающий эксцентриситет не приводит к увеличению aberrаций и снижению эффективности обработки. С другой стороны, смещение оси линзы относительно оси лазерного излучения вызывает соответствующее смещение фокуса луча, что может быть использовано при проектировании систем наведения луча на линию обработки и систем слежения. Эту закономерность также можно применять при обработке поверхностей по круговой траектории, возникающей при вращении эксцентричной линзы вокруг оси луча. В частности, с учетом этого можно повысить эффективность процесса сварки круговых швов на плоских и сферических поверхностях.

Для достижения высокой эффективности обработки вращающейся эксцентричной линзой необходимо провести оптимизацию параметров фокусировки, что обеспечит минимальный размер фокального пятна и максимальную концентрацию энергии.

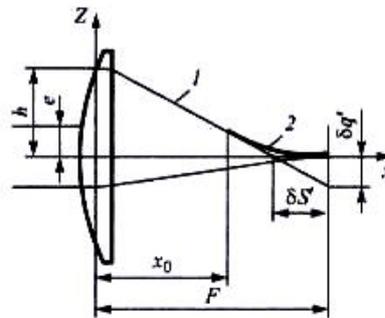


Схема фокусировки луча эксцентричной линзой:

1 — диаметральный луч; 2 — каустическая кривая

Ход лучей после линзы можно описать двумя уравнениями:

$$\text{Прямой 1 } z = -(h/F + P_{\text{л}} h^3 / F^3)x + h$$

$$\text{Кривой 2 } z = \left( \frac{F-x}{3P_{\text{л}}x} \right)^{3/2} + 2P_{\text{л}}x$$

Положение точки  $X_0$  перехода от прямой к каустической кривой определяется:

$$X_0 = \left( h - \frac{2P_{\text{л}}h^3}{F^2 + 3P_{\text{л}}h^2} \right) \frac{F^3}{hF^2 + P_{\text{л}}h^3}.$$

Использование данных уравнений позволяет найти поперечное сечение сфокусированного излучения линзы в любой произвольной плоскости, расположенной перпендикулярно оси линзы.

*Расчет параметров зеркальных объективов.* Для фокусировки мощного лазерного излучения, применяемого в технологических целях, предпочтительно использовать обращенные объективы Кассегрена. Применение последних позволяет полностью устранить сферические aberrации третьего порядка при использовании в них не только специальных параболидадного и гиперболидадного зеркал, но и сферических зеркал. Отсутствие сферических aberrаций третьего порядка обеспечивается при следующих соотношениях малого  $r_1$  и большого  $r_2$  радиусов кривизны и расстояния  $L$  между поверхностями зеркал:

$$r_1 = 1.236F$$

$$r_2 = 3.236F = 2.618r_1$$

$$L = r_2 - r_1$$

Выражение означает, что оно записано для случая, когда зеркала расположены концентрически.

Большую перспективу при лазерной обработке представляют внеосевые обращенные объективы Кассегрена. Использование таких объективов позволяет обеспечить отсутствие экранирования при

$$P_0 > 2.618r_L$$

где  $P_0$  — расстояние оси луча от оси объектива;  $r_L$  — радиус лазерного излучения.

В общем случае форма пятна, сфокусированного внеосевым объективом, круглой не является. Поэтому оптимизацию параметров фокусирующей оптики следует проводить не по поперечным размерам пятна, а по его площади. Однако результаты расчетов показали, что форма пятна хорошо аппроксимируется эллипсом, и для нахождения его площади достаточно вычислить расстояние между точками  $(x_0, z_0)$  и  $(x_2, z_2)$  в плоскости рисунка и в перпендикулярном этой плоскости направлении

### Модуль 3 «Поверхностная лазерная обработка»

Анализ и классификация методов поверхностной лазерной обработки. Основные технологические лазеры, применяемые для поверхностной обработки. Методы лазерной термообработки классифицируют по типу физических процессов, происходящих при воздействии излучения на поверхность материала (нагрев, оплавление, испарение, ударное воздействие), а также по технологическим признакам.



Классификация методов поверхностной лазерной обработки по технологическим признакам

Методы лазерной термообработки аналогичны обычным методам термической обработки сплавов. При выполнении поверхностной лазерной обработки проводят следующие технологические процессы:

- 1) лазерную термообработку;
- 2) лазерное оплавление;
- 3) получение поверхностных покрытий;
- 4) ударное воздействие;
- 5) инициирование химических реакций.

Лазерная термообработка включает в себя лазерную закалку (термоупрочнение), отжиг и отпуск.

Для осуществления лазерной закалки локальный участок поверхности массивной детали нагревают с помощью излучения до сверхкритических температур, после прекращения действия излучения происходит охлаждение этого участка с большой скоростью в результате теплоотвода во внутренние слои металла. При этом в сплавах с высокой твердостью поверхности образуются закалочные структуры.

В том случае, когда толщина обрабатываемой детали соизмерима с размерами зоны лазерного воздействия и условия ускоренного теплоотвода не обеспечиваются, имеет место лазерный отжиг. Такая технологическая операция заключается в нагреве лазером закаленных деталей до температур ниже критических. Она нашла широкое применение в микроэлектронике для отжига полупроводниковых материалов, особенно имплантированных на металлические подложки. Отжиг может быть использован для обработки мелких деталей в приборостроении, например пружинных элементов и др.

Лазерный отпуск заключается в высокоскоростном нагреве металла вплоть до температур  $A_{c1}$ . Его используют для повышения пластичности в локальных участках закаленных деталей. По сравнению с традиционным видом этой термической обработки он имеет некоторые особенности, описанные ниже.

Лазерное оплавление как технологическая операция для улучшения качества поверхности (уменьшения пористости или шероховатости) стало развиваться с началом использования лазерного излучения. При оплавлении режимы обработки подбирают исходя из требований получения наилучшей микрогеометрии поверхности; при этом скорость охлаждения, как правило, не регламентируется. Так как при аморфизации скорость охлаждения должна быть достаточной для получения аморфного состояния, глубина оплавления не должна превышать 50 мкм.

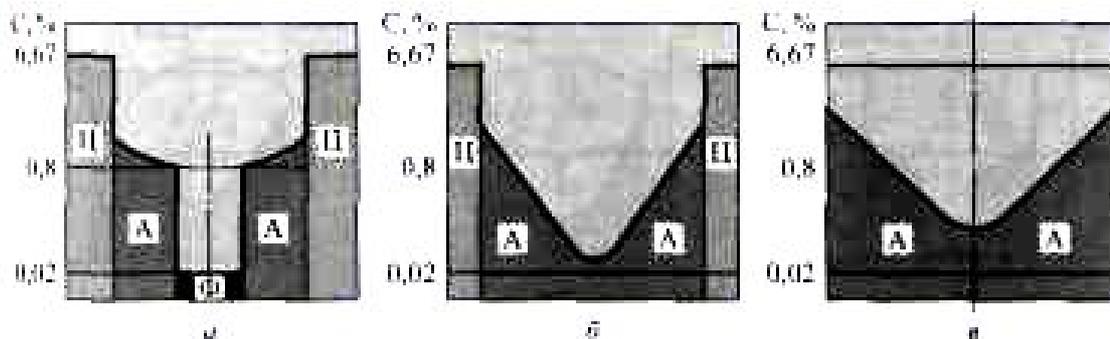
Для получения поверхностных покрытий в основном используют такие методы, как легирование и наплавка. В случае их применения участок поверхности нагревают выше температуры плавления и в зону оплавления вводят легирующие компоненты. В результате этого образуется поверхностный слой с химическим составом, отличным от состава основного металла. Кроме того, для получения поверхностных покрытий используют вакуумно-лазерное напыление, заключающееся в испарении материала участка поверхности под воздействием лазерного излучения в вакууме и конденсации испарившихся продуктов на подложке.

Ударное воздействие лазерного излучения можно использовать для упрочнения поверхности и инициирования физико-химических процессов, например для формирования р-п-переходов в полупроводниковых материалах.

*Закономерности образования структуры сплавов при лазерной термообработке поверхности.* В результате лазерной обработки в сталях формируется структура, состав которой зависит от степени завершенности процесса аустенитизации при нагреве, определяемой временем лазерного воздействия, исходной структурой, а также скоростью и температурой нагрева. При достаточно высокой температуре или относительно большом времени воздействия возможно формирование однородного аустенита. В случае уменьшения температуры нагрева и времени лазерного воздействия в результате повышения температуры критических точек и замедления гомогенизации аустенит в стали отличается большой неоднородностью, особенно по углероду. Неоднородность структуры усиливается тем, что при высокой температуре в стали могут находиться нерастворившиеся карбиды.

Рассмотрим некоторые виды неоднородностей, которые могут иметь место в той или иной части зоны лазерного воздействия сталей. Так, в *эвтектоидной стали* в зависимости от завершенности трех стадий аустенитизации возможны неоднородности, обусловленные неполным превращением  $\Phi \rightarrow A$ , неполным растворением цементита и неполным выравниванием концентрации углерода в аустените. В первом случае в нагретом состоянии в состав стали входят три фазы: цементит, аустенит и феррит. Между этими фазами наблюдается большой градиент концентрации углерода. Во втором случае в стали

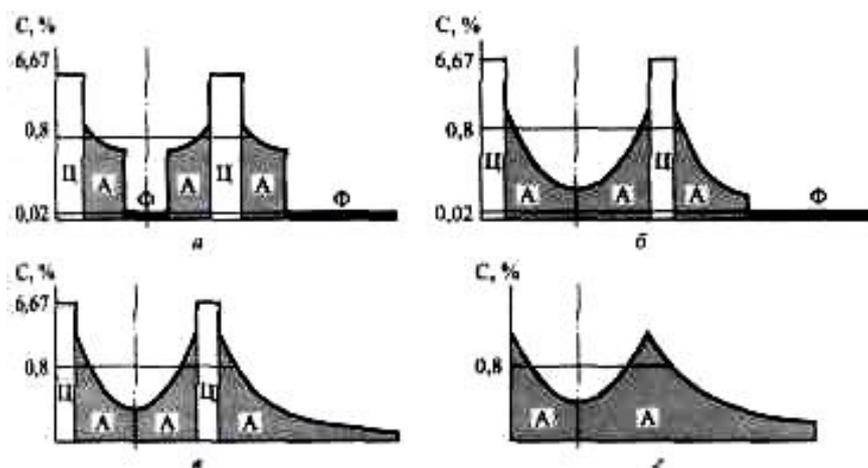
содержатся цементит и аустенит с достаточно большой неоднородностью по углероду (см. рис. 5.4, б). В третьем случае имеется одна фаза — аустенит с неодинаковым содержанием углерода на разных участках (см. рис. 5.4, в). Следует отметить, что здесь рассмотрена только субмикронеоднородность, поскольку межпластинчатое расстояние в перлитной стали составляет 0,25...0,6 мкм, и из-за



Неоднородности структуры в эвтектоидной стали

большой скорости выравнивания концентрации углерода на таком расстоянии зафиксировать неоднородность сложно.

В *доэвтектоидной стали* неоднородность по углероду имеется не только внутри бывшего зерна перлита, но и между бывшими перлитными и ферритными участками. При неполном превращении  $\Phi \rightarrow A$ , перлите и избыточном феррите имеет место наибольшая неоднородность по фазовому составу и концентрации углерода. В нагретом состоянии в состав стали входят цементит, аустенит и феррит. Возможен случай, когда в пределах бывшего зерна перлита превращение  $\Phi \rightarrow A$ , завершено, а превращение избыточного феррита не закончено. При завершении превращения  $\Phi \rightarrow A$ , когда растворения цементита не происходит (случай изменения последовательности структурных превращений), в сталях имеются две фазы — цементит и аустенит. После полного растворения цементита между бывшими ферритными и перлитными участками имеется неравномерность по углероду

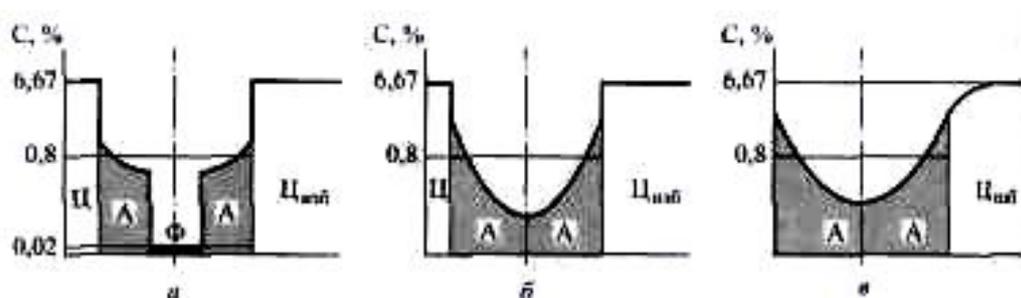


Неоднородности структуры в доэвтектоидной стали

В *заэвтектоидной стали*, в которой присутствуют три фазы: цементит, аустенит и феррит, при незавершении превращения  $\Phi \rightarrow A$  имеет место наибольшая неоднородность. До растворения перлитного цементита перепад концентрации углерода наблюдается только в пределах бывшего перлитного зерна, после его растворения имеет место перепад концентрации углерода между бывшим перлитным зерном и избыточным цементитом.

Как отмечалось выше, в условиях сверхвысоких скоростей нагрева возможно изменение механизмов превращения  $\Phi \rightarrow A$ , т. е. полиморфное превращение без концентрационного

перераспределения углерода или превращение по мартенситному механизму. В связи с этим превращение  $\Phi \rightarrow A$  может завершиться во всех случаях на месте феррита можно указать аустенит. При этом схема распределения содержания углерода по участкам принципиально не изменяется.



Неоднородности структуры в заэвтектоидной стали

Кроме скорости нагрева степень неоднородности зависит от дисперсности исходной структуры: чем мельче структура, тем меньше неоднородность аустенита. Ввиду этого в закаленной или низкоотпущенной стали может иметь место лишь концентрационная неоднородность аустенита, да и то в чрезвычайно ограниченной области, которую экспериментально зафиксировать трудно.

*Структура и строение поверхностных слоев различных сталей после лазерной термообработки.* Поскольку при лазерной обработке разные слои нагреваются до различных температур, зона лазерного воздействия (ЗЛВ) имеет слоистое строение. Рассмотрим строение ЗЛВ после лазерной закалки сталей. По результатам измерения микротвердости и исследования микроструктуры по глубине ЗЛВ в основном можно отметить три принципиально различных по природе фазовых превращения слоя (рис. 5.8).

Первый слой — зона оплавления (30) — образуется при закалке из расплавленного состояния. В большинстве случаев он имеет столбчатое ячеисто-дендритное строение, причем кристаллы вытянуты в направлении теплоотвода. Основной структурной составляющей является мартенсит; карбиды обычно растворяются. После лазерной закалки сталей в интервале реально применяемых на практике режимов кратеры, шлаковые включения и обезуглероженные зоны в 30 отсутствуют. При лазерной закалке без оплавления первый слой — 30 — также отсутствует.



Строение зоны лазерного воздействия после лазерной закалки

Второй слой — зона закалки из твердой фазы — образуется при закалке из твердого состояния. Нижняя граница его определяется нагревом до температуры точки  $A_{c1}$ , т. е. в этом слое имеет место как полная, так и неполная закалка. Этот слой отличается большой неоднородностью по глубине: ближе к поверхности имеются мартенсит и остаточный аустенит, полученные при охлаждении из области гомогенного аустенита, а ближе к

исходному металлу — структуры, полученные при охлаждении из области неомогенного аустенита. Поэтому здесь наряду с мартенситом наблюдаются элементы исходной структуры: феррит в доэвтектоидной и цементит в заэвтектоидной стали.

Третий слой — переходная зона — образуется при нагреве металла ниже точки  $A_{c1}$ . При лазерной обработке предварительно закаленной или отпущенной стали в этом слое имеет место понижение микротвердости, связанное с образованием структур отпуска — троостита или сорбита. Третий слой в этом случае называют зоной отпуска.

Второй и третий слои образуют зону термического влияния (ЗТВ).

Принципиального различия в строении и микроструктуре различных СЛОЙ после лазерной обработки импульсными и непрерывными лазерами нет, имеются лишь отдельные особенности, обусловленные разным временем воздействия.

*Доэвтектоидные углеродистые стали.*

1. *Особенности формирования микроструктуры в ЗЛВ низкоуглеродистых сталей.*  
Структура, получаемая после лазерной обработки, зависит от скорости нагрева и охлаждения, а также от времени пребывания нагретых слоев при повышенной температуре. Зона закалки из твердой фазы в этих сталях отличается большой структурной неоднородностью, особенности структуры в значительной степени зависят от режимов проведения процессов.

В процессе нагрева при малой скорости обработки в верхней и средней части ЗТВ успевают произойти диффузионное выравнивание концентрации углерода и перекристаллизация с измельчением зерна. В данных условиях обработка фазовые переходы подчиняются общим закономерностям. Образование аустенита при нагреве начинается на границах перлита с ферритом. Рекристаллизация происходит в основном в  $\gamma$ -фазе.

В средней области ЗТВ наблюдается измельчение всех зерен, что свидетельствует о полной перекристаллизации при нагреве, измельчении зерна аустенита и получении после охлаждения мелкого зерна феррита.

В условиях повышенных скоростей нагрева начинают проявляться особенности лазерной обработки. Это выражается в замедлении процессов рекристаллизации и сохранении взаимной кристаллографической ориентировки  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз, что обуславливает восстановление зерна, т. е. не приводит к измельчению зерна аустенита.

Ввиду указанных выше особенностей структуры ЗЛВ лазерная закалка низкоуглеродистых сталей большой перспективы для применения в промышленности не имеет.

2. *Особенности формирования микроструктуры в ЗЛВ среднеуглеродистых сталей.*  
В процессе лазерного термоупрочнения среднеуглеродистых сталей степень завершенности аустенитизации определяется максимальными температурами, до которых нагреваются те или иные зоны, скоростями нагрева и охлаждения, а также временем пребывания при температурах выше  $A_{c1}$ . В верхних слоях, нагретых до температур плавления и околосолидусных температур (зона оплавления и верхняя часть ЗТВ), происходят полное превращение избыточного феррита в аустенит и полное насыщение бывших ферритных участков углеродом. При этом в процессе охлаждения образуется мелкодисперсный мартенсит с рельефными границами между пластинами, а в некоторых случаях — с небольшим количеством бейнита.

В нижних слоях, нагретых до более низких температур, насыщение углеродом бывших ферритных участков произойти не успевает. Это приводит к снижению устойчивости аустенита, увеличению критической скорости охлаждения, а при сравнительно невысоких скоростях охлаждения металла этой зоны — образованию трооститной, трооститоферритной или ферритной сеток.

При разных скоростях обработки наблюдается некоторое различие в формировании термоупрочненной зоны. В основном это касается зоны закалки из твердого состояния.

В случае высокой скорости обработки диффузионное перераспределение углерода между избыточным ферритом и перлитными колониями замедляется. В результате этого мартенсит, образующийся на месте перлитных колоний, может иметь концентрацию

углерода, близкую к эвтектоидной. Часть цементитных пластин в перлите остается нерастворенной; возле них в обогащенных углеродом участках образуется мартенсит и некоторое количество аустенита, а в центральной части, где твердый раствор мало насыщен углеродом, — низкоуглеродистый мартенсит.

При выборе режимов лазерной обработки, учитывая рассмотренные выше закономерности формирования структуры в ЗЛВ доэвтектоидных углеродистых сталей, можно дать следующие рекомендации.

1. Не проводить лазерную закалку низкоуглеродистых сталей.
2. Так как при увеличении содержания углерода в стали до 0,3 % и выше твердость мартенсита после закалки резко возрастает, для закалки среднеуглеродистых сталей с содержанием углерода 0,3...0,6 % целесообразно использовать непрерывное лазерное излучение; их упрочнение следует проводить при невысоких скоростях.
3. Следует учитывать, что при лазерной обработке нормализованных или отожженных среднеуглеродистых сталей без оплавления с повышенными скоростями или при импульсной закалке область однородного мартенсита отсутствует и трооститоферритная сетка вокруг мартенсита может достигать поверхности образца; это приводит к снижению общей твердости ЗЛВ.
4. Необходимо иметь в виду, что при лазерной закалке сталей после их улучшения, т. е. закалки и высокого отпуска, область однородного мартенсита увеличивается.

*Эвтектоидные и заэвтектоидные стали.* В исходной структуре эвтектоидной стали не содержится избыточных фаз. В результате этого создаются оптимальные условия для формирования однородной микроструктуры, поскольку фазовые превращения и перераспределение концентрации при лазерной обработке происходят только в пределах перлитных колоний. На формирование структуры в условиях лазерного нагрева кроме превращения перлита в аустенит оказывает влияние растворение избыточного цементита, который может сохраняться до достижения весьма высоких температур.

При лазерной обработке с оплавлением эвтектоидных и заэвтектоидных углеродистых сталей в зоне оплавления кроме мелкодисперсного мартенсита имеется остаточный аустенит. С увеличением содержания углерода микротвердость мартенсита значительно повышается. Следует обратить внимание на то, что увеличение остаточного аустенита в зоне оплавления некоторых сталей может привести к уменьшению микротвердости. В нижней части зоны оплавления на границе с ЗТВ в процессе лазерного нагрева первые порции расплава имеют повышенную концентрацию углерода. После резкого охлаждения в этих микрообъемах возможно образование мелкодисперсных карбидов, входящих в состав эвтектики (ледебурита). В результате этого микротвердость на границе между зоной оплавления и ЗТВ существенно повышается.

При выборе режимов лазерного термоупрочнения следует учитывать, что увеличение содержания углерода в металле термообрабатываемых объемов выше 0,6 % приводит к резкому снижению темпа прироста твердости. Оптимальным является создание в нагреваемой зоне условий, при которых карбиды растворяются не полностью, а только в такой степени, чтобы обеспечить получение высокоуглеродистого мартенсита (0,6 % С), но избежать образования повышенного количества остаточного аустенита. Другими словами, заэвтектоидные стали рекомендуется упрочнять, используя режимы, обеспечивающие получение структур с нерастворенными карбидами, т. е. процесс лазерной термообработки необходимо проводить с наибольшими скоростями охлаждения. Эффективной для этой цели оказывается импульсная закалка с оплавлением поверхности. При осуществлении такой закалки достигается оптимальное сочетание структурно-концентрационной неоднородности и насыщенности твердого раствора.

*Легированные стали.*

1. *Низкоуглеродистые легированные стали.* Введение легирующих элементов в доэвтектоидных сталях благоприятно сказывается на формировании микроструктуры после лазерной обработки.

В низколегированных низкоуглеродистых сталях микроструктура в разном областях ЗЛВ идентична микроструктуре доэвтектоидных сталей с низким содержанием углерода.

В зоне оплавления в верхней части зоны лазерного воздействия, так же как в доэвтектоидных низкоуглеродистых сталях, образуется реечный мартенсит с рельефными границами между пакетами. Однако длина реек мартенсита заметно меньше. По мере увеличения глубины в зоне термического влияния неоднородность микроструктуры повышается: образуются участки феррита с микротвердостью 2000...2500 МПа и участки мартенситотроостита с микротвердостью 3400...4800 МПа. В нижней части зоны термического влияния на границе с исходной структурой находятся феррит и бейнит. Границы бейнитных зерен (микротвердость 2800...5300 МПа) размыты и имеют повышенную травимость. Образование бейнита обусловлено уменьшением скорости охлаждения на границе с исходным металлом.

Так же, как и низкоуглеродистые, низколегированные низкоуглеродистые стали упрочнять лазерным излучением нецелесообразно из-за возникновения структуры с невысокой твердостью и большой толщины слоя с незавершенной аустенитизацией при нагреве.

2. *Среднеуглеродистые легированные стали.* В среднеуглеродистых легированных сталях при обработке с минимальным оплавлением в ЗЛВ микротвердость заметно выше, чем в среднеуглеродистых доэвтектоидных сталях. Кроме мартенсита в зоне оплавления имеется остаточный аустенит, что свидетельствует о некоторой концентрационной неоднородности твердого раствора. В ЗЛВ слой полной закалки со структурой мартенсита располагается вплоть до исходной структуры.

Введение легирующих элементов в среднеуглеродистые легированные стали благоприятно сказывается на формировании микроструктуры после лазерной обработки. Снижение количества избыточного феррита в исходной структуре и уменьшение критической скорости закалки при охлаждении приводят к тому, что в ЗЛВ формируется относительно однородная микроструктура с высокой микротвердостью. Лазерную обработку этих сталей рекомендуется проводить при небольшой плотности мощности и невысокой скорости.

3. *Среднеуглеродистые высоколегированные стали.* К этим сталям относятся стали марок 40X13, 95X18. При их обработке с минимальным оплавлением микротвердость в зоне оплавления достигает весьма высоких значений. Это связано с большой насыщенностью мартенсита углеродом, а также с тем, что первые порции расплава сильно обогащены углеродом, в результате чего образуется аустенитно-ледебуритная структура. Но при уменьшении скорости обработки или при увеличении плотности мощности лазерная обработка с «глубоким» оплавлением приводит к снижению микротвердости как в зоне оплавления, так и в верхней части ЗЛВ. ЗЛВ этих сталей имеет мартенситно-аустенитную структуру с нерастворенными карбидами. Содержание углерода и легирующих элементов в мартенситно-аустенитных участках значительно выше, чем в зоне оплавления. Это приводит к увеличению количества остаточного аустенита (до 80 %). В результате этого микротвердость поверхности при переходе от обработки с оплавлением к обработке без оплавления скачкообразно снижается. Упрочнение среднеуглеродистых высоколегированных сталей следует проводить с минимальным оплавлением поверхности. Но предпочтительнее использование режимов, исключаящих оплавление поверхности при сохранении в ЗЛВ нерастворившихся избыточных карбидов.

4. *Высокоуглеродистые легированные стали.* В высокоуглеродистых легированных сталях увеличение количества легирующих элементов приводит к повышению неоднородности структуры в ЗЛВ. Это обусловлено уменьшением коэффициента диффузии углерода и увеличением стойкости карбидов. В зоне оплавления таких сталей возникает мелкодисперсная структура, содержащая высокоуглеродистый мартенсит и остаточный аустенит. При высокой скорости обработки в приповерхностном слое зоны оплавления имеются нерастворенные карбиды. Микротвердость в зоне оплавления достаточно велика и

достигает 12 000 МПа, что выше, чем после обычной закалки. Однако в большинстве случаев здесь обнаруживаются микротрещины, поэтому обрабатывать эти стали с оплавлением не рекомендуется. Для получения наибольшей твердости упрочнять данные стали лучше всего при малой длительности воздействия лазерного излучения, при которой карбиды растворяются лишь до такой степени, чтобы обеспечить насыщение мартенсита и в то же время избежать увеличения содержания остаточного аустенита. Очевидно, это легко достигается при импульсной закалке без оплавления или при закалке непрерывным лазером с повышенными скоростями обработки. Обрабатывать эти стали с оплавлением не рекомендуется.

5. *Высоколегированные инструментальные стал.* Диффузионная подвижность углерода в высоколегированных сталях уменьшается настолько, что осуществить лазерную закалку при оптимальной степени аустенитизации, т. е. с достаточным насыщением твердого раствора и минимальным растворением карбидной фазы, трудно. При малой мощности излучения насыщение аустенита может не достигаться, и при закалке образуются низкоуглеродистый мартенсит и остаточный аустенит. В случае большой энергии излучения возможно пересыщение аустенита в результате растворения карбидов, после охлаждения образуется большое количество остаточного аустенита. Для высоколегированных сталей имеется узкий интервал режимов, при которых в мартенсите содержится достаточное количество углерода, а растворение карбидов находится в начальной стадии. Этот интервал режимов лазерной закалки для каждой стали индивидуален; осуществить его можно как при обработке без оплавления, так и с минимальным оплавлением поверхности.

*Структура и строение зоны лазерного воздействия титановых сплавов, при лазерной закалке.* При лазерной обработке титановых сплавов с оплавлением поверхности образуются две зоны: зона оплавления и зона термического влияния. При обработке на воздухе или в струе азота поверхность зоны оплавления имеет темный цвет, а микроструктура в ней — дендритное или ячеистое строение со стерженьковыми включениями. Иногда кроме дендритов образуются зерна  $\beta$ -фазы. Микротвердость в этой зоне колеблется в широком интервале, причем с увеличением легированности сплава микротвердость снижается.

В процессе оплавления на воздухе или в струе азота титановые сплавы насыщаются газами, в первую очередь азотом. При этом вследствие образования нитридов и оксидов титана твердость повышается. Кроме того, зафиксировано образование мартенситных фаз  $\alpha'$  и  $\alpha''$ , что обычно может произойти в двухфазных ( $\alpha+\beta$ )-сплавах при закалке. Это всегда приводит к повышению твердости, причем  $\alpha'$ -фаза значительно тверже, чем  $\alpha''$ . С возрастанием легирующих элементов в титановых сплавах количество  $\alpha''$ -фазы увеличивается, что сопровождается некоторым уменьшением микротвердости.

*Структура и строение зоны лазерного воздействия алюминиевых и магниевых сплавов, при лазерной закалке.* Поскольку алюминиевые сплавы характеризуются такими свойствами, как высокие теплопроводность и отражательная способность, трудность растворения примесей и промежуточных фаз в условиях кратковременного нагрева, а также отсутствие мартенситных превращений, при лазерной закалке, особенно импульсной, осуществлять упрочнение этих сплавов сложно.

Отличительной особенностью строения ЗЛВ алюминиевых сплавов является то, что у них четко выделяется только первый слой — зона оплавления. Зона закалки из твердой фазы и переходная зона металлографически не обнаруживаются, и существенных изменений микротвердости в них не наблюдается. Это обусловлено их низкой температурой плавления, высокой теплопроводностью, а также отсутствием структурных превращений в твердом состоянии при скоростной обработке. Наилучшие результаты достигаются при термообработке с оплавлением поверхности.

Упрочнение таких сплавов возможно путем измельчения зерна и увеличения дефектности кристаллического строения.

Возможность лазерного упрочнения зависит от исходного состояния сплава. Если сплав не упрочнен и его структура представляет собой твердый раствор с включениями стабильной вторичной фазы, то при лазерной закалке можно получить пересыщенный твердый раствор. При этом вследствие пересыщения твердого раствора, измельчения структуры и увеличения дефектности кристаллического строения достигается небольшое упрочнение.

Так же, как и при лазерном термоупрочнении алюминиевых сплавов, при обработке медных сплавов оптимальные результаты обеспечиваются при шике из жидкого состояния. При обработке с оплавлением осуществлять упрочнение можно по различным механизмам, а именно:

- 1) в результате пересыщения твердого раствора, измельчения структуры! увеличения ее дефектности;
- 2) вследствие выделения в процессе охлаждения упрочняющих метастабильных фаз, особенно в условиях закатки из жидкого состояния; при этом образуются метастабильные фазы ограниченной или неограниченной метастабильности;
- 3) при большом пересыщении одной из фаз в результате растворения в ней других;
- 4) вследствие мартенситного превращения, происходящего в условиях высоких скоростей охлаждения в некоторых медных сплавах.

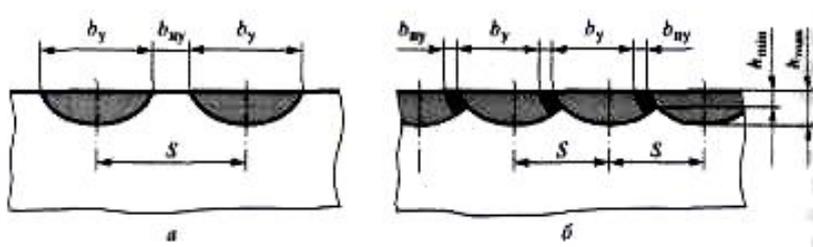
При обработке сплавов с однофазной структурой твердого раствора осуществлять упрочнение можно путем измельчения зерна и увеличения дефектности кристаллического строения. Следует иметь в виду, что при этом для некоторых составов может иметь место снижение микротвердости.

*Различные схемы импульсного лазерного упрочнения поверхностей.* Если обрабатываемая поверхность вписывается в размеры лазерного пятна, до желаемой конфигурации упрочнения добиваются наложением на поверхность трафарета или методом масок (фотошаблонов). Недостатком таких методов являются большие потери излучения, а также низкая стойкость трафаретов и масок против их разрушения. Сформировать упрочненную зону можно путем нанесения поглощающих покрытий необходимой конфигурации, для чего требуется точный подбор режимов обработки, что не всегда обеспечивает отсутствие теплового влияния на непокрытую поверхность. Лазерное пятно на поверхности детали с помощью различных оптических систем можно получить в форме круга, кольца, прямоугольника и т. д.

При упрочнении большой площади требуемой конфигурации наиболее распространено последовательное наложение единичных пятен в форме круга, т. е. обход по заданному контуру с шагом  $S$ . Важным параметром при этом является коэффициент перекрытия, определяемый по формуле  $K_n = S/d_n$ .

Тогда скорость относительного линейного перемещения луча по детали можно выразить следующим образом:

$$v = K_n d_n f$$



Схемы наложения нескольких пятен при  $K_n > 1$  (а) и  $K_n < 1$  (б)

В таком случае к характеристикам упрочнения поверхности необходимо добавить равномерность глубины, определяемую отношением ее минимального и максимального

значения ( $h_{\min}/h_{\max}$ ), а также долю неупрочненной части поверхности  $b_{ny}/b_y$ .

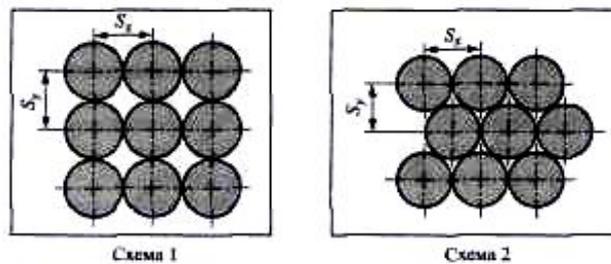
Если обработку по контуру осуществляют по двум координатам: по оси  $Ox$  с шагом  $S_x$  и по оси  $Oy$  с шагом  $S_y$ , то для описания процесса также применяют такие характеристики, как коэффициент заполнения  $K_z$  и коэффициент использования импульсов  $K_u$ :

$$K_z = F_{\text{упр}} / F_{\text{конт}}; K_u = F_{\text{упр}} / \sum_{i=1}^n F_i$$

где  $F_{\text{упр}}$  — упрочненная площадь в контуре;  $F_{\text{конт}}$  — площадь контура, подлежащего упрочнению;  $F_i$  — площадь единичного пятна.

Производительность процесса упрочнения при импульсной обработке с частотой следования импульсов  $f_i$  можно определить по уравнению

$$N = F_{\text{упр}} / t = K_u \sum_{i=1}^n F_i / t = \pi d^2 K_u f_i / 4$$



Схемы расположения нескольких пятен с обходом по контуру при  $K_n=1$

При использовании цилиндрических линз зона лазерного воздействия, полученная в результате облучения единичным импульсом, на поверхности заготовки имеет вытянутую форму. Как и в случае сферических линз, обработку по контуру осуществляют с перекрытием пятен. Коэффициент перекрытия в этом случае по координате  $X$  определяется отношением  $K_{xn}=S_x/L$ , а по координате  $Y$  — отношением  $K_{yn}=S_y/b_c$ .

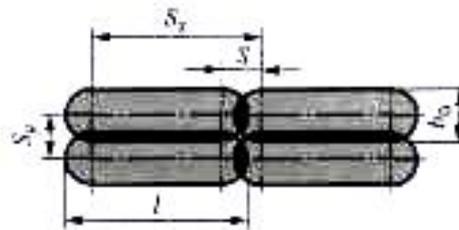


Схема наложения пятен при использовании цилиндрической оптики

Скорость относительного линейного перемещения при использовании цилиндрической оптики заметно больше, чем в случае применения сферической оптики. Ее можно найти по формуле

$$v = S_n f = (L + bK_n) f$$

При использовании цилиндрической оптики увеличивается и производительность обработки, но практика показывает, что обход по контуру для получения устойчивой глубины ЗЛВ целесообразно проводить при энергии не менее 30 Дж.

Принципиально возможны две схемы обхода по контуру. В схеме 1 пятна во всех рядах расположены друг под другом, а шаг по координате  $X$  равен шагу по координате  $Y$ . Схема 1 более проста для технологического использования и позволяет произвести упрочнение большего контура. Ее применяют при использовании сферической и цилиндрической оптики. В схеме 2 имеет место смещение пятен в рядах на половину шага, причем шаг по координате  $Y$  меньше, чем шаг по координате  $X$ . Схема 2 более сложна в конструктивном исполнении. Ее применяют только при использовании сферической оптики; качество

упрочнения при этом выше, так как доля неупрочненной части поверхности  $b_{ny} / b_y$  здесь меньше. При  $K_n > 1$  и  $K_n < 1$  эти две схемы могут иметь разновидности, что обуславливает изменение  $K_3$  и  $K_u$ , а также изменение ряда характеристик упрочненного слоя. Например, в схеме 1 при  $S_x = S_y$  и  $K_n = 0,7$  заполнение поверхности максимально ( $K_3 = 0,96$ ), но коэффициент использования импульсов невысок ( $K_u = 0,46$ ), что приводит к непроизводительному расходованию энергии излучения. В схеме 2 при  $S_x = S_y = 0,8 d_n$  непроизводительные расходы энергии заметно уменьшаются,  $K_u = 0,72$  и  $K_3 = 0,94$ . С учетом этого наилучшие результаты достигаются в случае применения этой схемы упрочнения при  $S_x = 0,86 d_n$  и  $S_y = 0,74 d_n$ . При этом  $K_3 = 0,95$  и  $K_u = 0,74$ .

*Основные параметры лазерной закалки непрерывным ЛИ и характеристики упрочненной поверхности.* Лазерная закалка непрерывными лазерами имеет ряд достоинств по сравнению с импульсной. Во-первых, нет ограничений по длительности лазерного воздействия. Это позволяет увеличить производительность процесса и геометрические размеры упрочненных зон, а также в более широком интервале изменяя структуру и свойства ЗЛВ, в частности, полнее осуществлять процесс гомогенизации аустенита при нагреве стали. Во-вторых, по длине упрочненных зон отсутствуют зоны многократного нагрева, а следовательно, имеется возможность увеличения равномерности свойств по поверхности.

Основными параметрами лазерной закалки непрерывными лазерами являются мощность излучения  $P$  и диаметр пятна  $d_n$  которые, как и при импульсной обработке, определяют плотность мощности. Кроме того, к ним относится скорость перемещения детали относительно луча, от которой зависит длительность лазерного воздействия.

Зона упрочнения на поверхности детали имеет форму полосы, а сечение, перпендикулярное движению лазерного луча, — такую же форму сегмента, как и при импульсной обработке. Упрочненная поверхность имеет те же характеристики, что и поверхность при импульсной закалке.

Микротвердость поверхностного слоя зависит от режимов обработки и химического состава сплава. При обработке с оплавлением среднеуглеродистой стали и ряда сплавов с увеличением скорости обработки микротвердость повышается. Это связано с увеличением скорости охлаждения. С повышением содержания углерода или легирующих элементов в стали микротвердость при увеличении скорости обработки возрастает не так заметно, поскольку при этом может повышаться количество остаточного аустенита. При обработке без оплавления из-за незавершенности процессов гомогенизации микротвердость может уменьшаться.

Параметры шероховатости поверхности при обработке с оплавлением имеют сложную зависимость от режимов. При большом объеме расплавленного металла (обработка с большой мощностью) с уменьшением скорости обработки высота микронеровностей и максимальная высота наплывов за счет увеличения растекаемости расплава и смачиваемости поверхности уменьшаются.

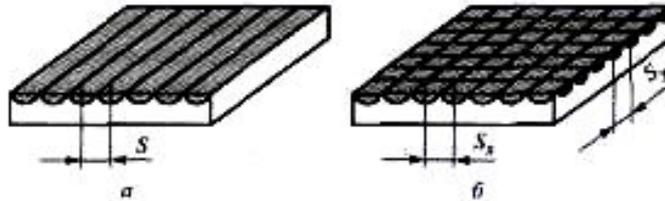
В случае малого объема расплавленного металла (обработка с малой мощностью) с увеличением скорости обработки высота наплывов увеличивается. При переходе на режим лазерной закалки без оплавления параметры шероховатости поверхности практически равны исходным.

Перспективным направлением для уменьшения шероховатости при лазерной закалке с оплавлением может быть разработка процесса с использованием добавок, уменьшающих поверхностное натяжение расплава и увеличивающих смачиваемость поверхности.

*Технологические схемы закалки непрерывным ЛИ.* При обработке больших поверхностей непрерывными лазерами наиболее широко используют два вида последовательного наложения упрочненных полос: обработка плоских поверхностей и обработка цилиндрических поверхностей. Как и при импульсной закалке, в данном случае

важной характеристикой является коэффициент перекрытия  $K_{\Pi}$ , определяемый отношением  $K_{\Pi} = S/d_n$ . Полосы могут быть наложены с перекрытием (при  $K_{\Pi} < 1$ ) и без перекрытия (при  $K_{\Pi} > 1$ ). Тогда к характеристикам упрочнения необходимо добавить равномерность глубины  $h_{\min}/h_{\max}$  и долю неупрочненной части поверхности  $b_{ny}/b_y$ .

Следует отметить, что в отличие от импульсной закалки с перекрытием, где в основном имеет место обработка с  $K_{\Pi} = 0,5$ , при непрерывной закалке из-за значительного теплового влияния при наложении полосы на предыдущую полосу значение  $K_{\Pi}$  лишь немного меньше единицы. Обработку плоских поверхностей осуществляют по двум схемам наложения полос: линейной и клеточной. После наложения каждой полосы деталь или луч периодически смешают в поперечном направлении на расстояние, равное шагу  $S$ . При использовании клеточной схемы наиболее



Схемы наложения полос на плоской поверхности

Обработку цилиндрических поверхностей осуществляют по трем схемам: наложение односпиральных полос, наложение двух спиральных полос навстречу друг другу с постоянной осевой подачей  $S$ , а также наложение полос вдоль оси по образующей с периодическим вращением детали для смещения на шаг  $S$ . По этим же схемам производят упрочнение внутренних цилиндрических поверхностей. Упрочнение внутренних поверхностей втулок и других деталей осуществляют с помощью отклоняющего зеркала вводимого внутрь детали. В этом случае возникает необходимость охлаждения и защиты зеркала от испарений и копоти.

При получении спиральных полос для достижения заданной линейной скорости обработки  $v$  втулку вращают непрерывно с частотой  $n$  с одновременным перемещением в продольном направлении с подачей  $S$ .

*Способы регулирования распределения плотности мощности по пятну при закалке непрерывными лазерами.* С целью обеспечения лучшего качества упрочнения закалку непрерывными и импульсными лазерами осуществляют в расходящемся пучке. Размеры пятна подбирают изменением степени расфокусировки. Однако при большой расфокусировке неоднородность плотности мощности по пятну увеличивается. Это приводит к неравномерности глубины ЗЛВ, уменьшению геометрических размеров ЗЛВ при обработке без оплавления, увеличению ширины зон отпуска при обработке с перекрытием и т. д.

Для увеличения равномерности плотности мощности или для формирования заданного распределения возможно применение сегментных и гибких фиксирующих зеркал.

*Лазерный отжиг.* В отличие от лазерной закалки лазерный отжиг используют с целью получения более равновесной структуры по сравнению с исходным состоянием, обладающей большей пластичностью и меньшей твердостью. Для этого скорость охлаждения материала после прекращения лазерного воздействия должна быть значительно меньше критической. Лазерный отжиг можно проводить с оплавлением поверхности и без оплавления. Зона лазерного воздействия в общем случае состоит из двух слоев: зоны оплавления и зоны термического влияния. При обработке без оплавления имеется только один слой — зона термического влияния. Во всех случаях микротвердость в ЗЛВ меньше, чем в исходном материале.

Уменьшение дефектности структуры после лазерного рекристаллизационного отжига приводит к снижению электрического сопротивления. Данный процесс находит широкое применение в технологии материалов электронной техники при подгонке сопротивления металлических резисторов, не прошедших вакуумный отжиг, а также металлокерамических резисторов из двухкомпонентных систем Cs—SiO<sub>2</sub>, Au — Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др. Кроме того, такой отжиг используют для формирования омических контактов в полупроводниковых приборах и для образования токовых дорожек.

Другим направлением лазерного отжига является снижение твердости и увеличение пластичности локальных участков для осуществления последующей деформации или увеличения сопротивления усталости. В этом случае лазерный рекристаллизационный отжиг применим не только для обработки материалов электронной техники, но и для обработки сталей и сплавов в машиностроении.

*Лазерный отпуск.* Лазерный отпуск проводят только без оплавления поверхности, при этом зона лазерного воздействия состоит из одного слоя — зоны отпуска.

При скоростном отпуске закаленной стали происходят те же фазовые и структурные превращения, что и при медленном нагреве в печи, т. е. имеются три стадии распада закаленной структуры: образование мартенсита отпуска, распад остаточного аустенита и формирование ферритно-цементитной сетки. Особенность этого процесса заключается в том, что температуры этих стадий смещаются вверх, причем наиболее интенсивно смешается температура распада остаточного аустенита. Ввиду этого при скоростном нагреве удастся четко разделить три стадии распада закаленной структуры.

Вследствие кратковременности лазерного воздействия отпуск можно проводить при температуре нагрева вплоть до точки  $A_{c1}$ . Следует ожидать, что искажения 2-го рода при скоростном отпуске будут значительно больше, а блоки  $\alpha$ -фазы существенно меньше по сравнению с отпуском в печи. Поэтому твердость стали после скоростного отпуска гораздо выше.

Кроме того, вследствие кратковременности воздействия при скоростном лазерном отпуске в структуре стали следует ожидать получения очень мелких карбидов. Поэтому в зонах лазерного воздействия после лазерного отпуска сталь имеет большую прочность, твердость, ударную вязкость, более низкий порог хладноломкости, а также меньшую отпускную хрупкость, чем после обычного отпуска в печи. С помощью такого отпуска на поверхности углеродистой стали

*Получение поверхностных покрытий при помощи лазерного излучения.* С целью улучшения поверхностных свойств изделий проводят лазерное поверхностное легирование. Его осуществляют путем введения в заданные участки поверхности различных компонентов, которые, смешиваясь с материалом основы, образуют сплавы или композиции требуемого состава. При этом обязательным условием является сохранение в обработанных лазером участках поверхности значительного количества атомов материала основы. Таким образом, принципиальное отличие легирования от закалки состоит в изменении химического состава поверхностного слоя материала.

Преимущества лазерного поверхностного легирования заключаются в следующем.

1. Хорошая воспроизводимость параметров и свойств поверхностного слоя.
2. Большая скорость процесса и достижение высокого качества поверхностного слоя.
3. Возможность получения узких локальных зон с заданным химическим составом.
4. Экономия дорогостоящего легирующего материала.
5. Отсутствие необходимости в последующей термообработке.
6. Экологическая чистота процесса легирования.

Без расплавления поверхности обеспечить достижение диффузионного насыщения легирующими элементами на большую глубину практически невозможно. Это связано с кратковременностью лазерного термического воздействия. Теоретический анализ

диффузионных процессов в твердой фазе при нагреве лазерным излучением показал, что глубина проникновения растворенного компонента небольшая, примерно 1 мкм при длительности импульса 4 мс.

Образование легированных зон сопровождается по крайней мере тремя процессами, приводящими к перемешиванию легирующих добавок с расплавом матрицы: массопереносом на расстояния в несколько сот микрометров в результате конвективного перемешивания, массопереносом на расстояния в несколько микрометров вследствие диффузии в жидкой и твердой фазах и массопереносом в результате действия термокапиллярных сил.

Зона лазерного легирования имеет строение, аналогичное строению зоны после лазерной закалки с оплавлением. Отличие состоит в том, что в металл расплавленной ванны вводят легирующие элементы. Диффузия элементов из зоны оплавления в зону термического влияния обычно происходит на расстояния не более 10 мкм. Однако в некоторых случаях экспериментально обнаружено перераспределение легирующих элементов в твердой фазе под зоной оплавления на глубине 200...300 мкм. Это может быть вызвано образованием тонких каналов жидкой фазы по границам зерен и блоков в твердом металле и массопереносом по этим каналам. Процессы массопереноса в твердой фазе также могут быть обусловлены дислокационным перемещением атомов в результате быстрых локальных деформаций.

Отличие строения зон, легированных лазером, от строения диффузионных покрытий состоит в отсутствии слоистости. Вследствие конвективного перемешивания расплава по мере удаления от поверхности перехода от фаз с большой концентрацией легирующего элемента к фазам с меньшей концентрацией не происходит. Все фазы в легированной зоне по глубине перемешаны примерно равномерно.

*Лазерное легирование неметаллическими компонентами.* Лазерное легирование неметаллическими компонентами — углеродом, азотом и бором — наибольшее распространение получило при использовании способа с нанесением на поверхность обмазок или паст и последующим оплавлением поверхности импульсным или непрерывным лазером.

В этом случае технологические режимы лазерного легирования определяются параметрами лазерной обработки и толщиной слоя пасты. С повышением мощности излучения или энергии импульса, уменьшением скорости обработки и увеличением длительности импульса размеры легированных зон возрастают, а концентрация легирующих элементов в них снижается. С увеличением толщины слоя пасты размеры легированных зон уменьшаются, а концентрация легирующего элемента повышается. Для каждой толщины слоя имеются критические режимы, при которых энергия лазерного излучения расходуется только на нагрев поверхности до температуры плавления, легирования в этом случае не происходит. Отмечено, что при лазерном легировании с перекрытием зон обработки микротвердость в зонах повторного нагрева снижается значительно меньше, чем при термоупрочнении.

Технологической особенностью лазерного легирования с оплавлением обмазок является то, что при этом не требуется нанесения поглощающих покрытий, поскольку обмазки, как правило, обеспечивают поглощение энергии лазерного излучения на уровне 60 % и более. Лучшие результаты были получены при лазерном легировании не полированной, а шероховатой поверхности, так как это позволило обеспечить лучшую адгезию обмазки и более полный переход легирующего компонента в расплав вследствие быстрого подшплевания вершин микронеровностей.

Рассмотрим некоторые методы лазерного легирования.

Цементация. В качестве паст или обмазок при лазерной цементации сталей можно применять растворы графита или сажи в ацетоне, спирте и других растворителях. Поскольку такие обмазки осыпаются с поверхности, часто используют растворы в различных лаках: бакелитовом, пековом каменноугольном и др. Кроме того, в состав паст добавляют

активирующие добавки: буру, хлорид аммония и т. д., увеличивающие степень усвоения элемента металлом в результате активации диффузии, аналогично как и при использовании диффузионных методов получения поверхностных покрытий.

В зависимости от количества вводимого углерода фазовый состав легированных зон и их микротвердость могут быть различными.

В процессе легирования при режимах, обеспечивающих введение небольшого количества углерода в зону оплавления низко- или среднеуглеродистой стали, ее структура состоит из мартенсита и остаточного аустенита. Вследствие высокой насыщенности мартенсита микротвердость в этом случае достаточно велика.

Таким образом, лазерную цементацию можно применить для повышения твердости углеродистых сталей.

Азотирование. При лазерном азотировании в качестве паст используют аммиачную соль, карбамид  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ . Азотирование железоуглеродистых сплавов из газовой фазы проводят в азоте при высоком давлении в специальной камере. Поскольку ввести лазерный луч в такую камеру достаточно сложно, этот метод имеет ограниченное применение.

Наиболее просто проводится газовое азотирование таких металлов, как титан, цирконий, гафний и их сплавов.

Для осуществления азотирования сплавов из жидкой фазы изделие помещают в жидкий азот.

В структуре легированных зон сталей имеется азотистый мартенсит, остаточный аустенит и нитриды железа. Лазерное азотирование можно применять для увеличения твердости, износостойкости и повышения теплостойкости деталей, поскольку азотистый мартенсит сохраняется при нагреве до высоких температур.

Силицирование. Этот процесс осуществляют либо с нанесением обмазок, содержащих порошок кремния, либо из жидкой фазы, например из суспензии силикагеля  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ . При концентрации кремния до 0,1 % в легированной зоне сталей структура представляет собой  $\alpha$ -железо, очевидно, мартенсит. При увеличении концентрации кремния кроме  $\alpha$ -железа в структуре зоны образуются силициды  $\text{Fe}_3\text{Si}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}_3$ ,  $\text{FeSi}$  и  $\text{Fe}_3\text{Si}_2$ . С повышением содержания кремния в зоне легирования железа или низкоуглеродистых сталей микротвердость возрастает от 8000 до 14000...15000 МПа. При наличии силицидов  $\text{FeSi}$  и  $\text{Fe}_3\text{Si}_2$  в зоне наблюдается образование пор и трещин. Отличительной чертой силицирования является большая равномерность микротвердости по всему объему зоны легирования.

После лазерного силицирования теплостойкость, износостойкость и коррозионная стойкость сталей значительно увеличиваются.

Борирование. Чаще всего борирование применяют с нанесением обмазок, которые представляют собой смеси порошков бора, карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$ , борного ангидрида  $\text{B}_2\text{O}_3$ , буры  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , а также ферробора со связующим веществом, например с клеем БФ-2. Наряду с этим используют водные суспензии некоторых из этих порошков; иногда применяют смесь борного ангидрида с графитом. Особенностью лазерного борирования с нанесением обмазок является образование кратера на поверхности легируемого металла при обработке с повышенной плотностью мощности излучения. Это обусловлено горением бора с выделением дополнительного количества теплоты, вследствие чего могут происходить процессы кипения и испарения металла.

Борирование можно осуществлять как при оплавлении поверхностных слоев, напыленных плазмой, так и при оплавлении диффузионных покрытий.

Отличием структуры борированных зон от азотированных и цементованных является отсутствие остаточного аустенита, что приводит к возрастанию твердости и износостойкости.

*Лазерное легирование металлическими компонентами.* В настоящее время проведены эксперименты по легированию железа и сталей многими чистыми металлами: Co, Cr, Sn, Mn, Nb, Ni, Mo, W, Ta, Ti, V, а также сплавами Cr—Mo—W, Ni—Nb и др. Оплавление

предварительно нанесенных компонентов на поверхность применяют как при импульсной, так и при непрерывной обработке. Процесс с подачей присадочного материала в зону обработки (в основном порошка) проводят только с использованием непрерывных лазеров, поскольку лишь в этом случае можно обеспечить синхронизацию подачи и воздействия излучения.

Отличительной особенностью формирования структуры легированных зон является большая пересыщенность твердого раствора, значительно превосходящая растворимость в равновесных условиях. Иногда возможно образование интерметаллидов. При легировании железоуглеродистых сплавов тугоплавкими и карбидообразующими компонентами микротвердость повышается, а при легировании некарбидообразующими компонентами, например никелем, - снижается.

После лазерного легирования чугуна и стали хромом коррозионная стойкость существенно возрастает и достигает тех же значений, что и у сплава с таким же содержанием хрома.

Кроме легирования черных металлов весьма перспективным является лазерное легирование цветных металлов и сплавов, в первую очередь алюминиевых и титановых. Алюминиевые сплавы обычно легируют такими компонентами, как железо, никель, титан, феррованадий, и сплавами Ni—Cr—B—Si, Co—Si и др. Структура легированной зоны представляет собой  $\alpha$ -твердый раствор легирующего элемента в алюминии и интерметаллидные фазы FeAl, VAl<sub>3</sub>, TiAl<sub>3</sub>, CoAl и NiAl.

Упрочнение при лазерном легировании поверхности алюминиевых сплавов достигается в результате:

значительного измельчения структуры;

пересыщения твердого раствора, как легирующими элементами сплава, так и легирующими элементами, вводимыми при лазерном легировании;

образования в зоне лазерного легирования интерметаллидных фаз, не свойственных системе компонентов сплава, что дает возможность упрочнения сплавов, лазерная термическая обработка которых невозможна или имеет малую эффективность;

возможности дальнейшего дисперсионного твердения при естественном и искусственном старении.

В процессе полного растворения легирующих элементов в твердом растворе микротвердость повышается примерно в 1,5 раза. С образованием интерметаллидов в легированной зоне микротвердость увеличивается в 2-5 раз. Однако при этом неравномерность ее распределена по глубине зоны лазерного легирования существенно возрастает, что может стать причиной хрупкого разрушения упрочненного слоя.

Зона лазерного легирования имеет три слоя. Первый слой, расположенный у самой поверхности образца, характеризуется мелкодисперсным строением; в нем содержатся частицы интерметаллидов равноосной или глобулярной формы. Это способствует достижению хороших эксплуатационных свойств легированной поверхности. Второй слой отличается наличием частиц интерметаллидов вытянутой или игольчатой морфологии. Третий слой близок по строению к слою, образующемуся при закалке исходного сплава из жидкого состояния. Включения интерметаллидных частиц в нем металлографически не обнаружены.

*Технологические особенности процесса лазерной наплавки.* Процесс наплавки условно можно разделить на три стадии; создания физического контакта; химического взаимодействия, т. е. образования прочных связей на микроучастках, и протекания объемных процессов. Активацию контактной поверхности при наплавке в основном осуществляют путем нагрева; при этом поверхностный слой детали практически всегда оплавляется. Поэтому наплавленный металл отличается по химическому составу от материала, используемого для наплавки. Это имеет место даже в верхних валиках, где влиянием перемешивания с основным металлом можно пренебречь.

В результате подплавления основного металла, его растворения в жидкой сварочной ванне, а также диффузионных процессов на межфазной границе, в наплавленный металл переходит значительная часть компонентов основы.

Минимальная глубина проплавления основы достигается при отдельном нагреве основного и присадочного металла, когда нагрев подложки осуществляется главным образом перегретой присадкой.

При порошковой лазерной наплавке большое внимание уделяют вопросу использования сканаторов лазерного луча, что позволяет увеличить геометрические размеры валиков, в частности ширину (например, свыше 10 мм). Это особенно актуально в случае нанесения широких слоев. Формирование валиков существенно зависит от условий сканирования. По максимальной высоте валиков и качеству наплавки получен следующий ряд траектории сканирования: линия, эллипс, окружность, а по частоте — 50, 150 и 250 Гц.

Возможные схемы подачи присадочных материалов в зону обработки можно разделить на две основные группы: с предварительным расположением присадочных материалов на обрабатываемой поверхности и с подачей присадочных материалов непосредственно в зону обработки одновременно с воздействием лазерного излучения.

Предварительное нанесение присадочных материалов на обрабатываемую поверхность. Из способов предварительного нанесения покрытий наиболее простым в реализации является способ насыпания, имеющий две модификации. В соответствии с первой из них присадочный материал насыпают на всю поверхность, которую необходимо легировать или наплавлять, при этом слой выравнивают по толщине; после этого производят его оплавление лазерным лучом. Применение такой схемы затруднено, так как возможные вибрации или какие-либо другие посторонние воздействия приводят к изменению толщины насыпанного слоя и оголению локальных участков модифицируемой поверхности, что в свою очередь обуславливает значительную неравномерность толщины слоя и неудовлетворительное качество поверхности.

Вторая модификация насыпания состоит в нанесении покрытия, состоящем из присадочного материала и связующего вещества. Нанесение паст осуществляют одним из известных промышленных методов: пульверизацией, окунанием и т. д. Предварительно нанесенный и высушенный слой пасты на поверхности заготовки называют шликерным слоем (шликером).

К другим методам нанесения присадки перед лазерным легированием можно отнести напрессовку порошков, накатку фольги, наложение прутков, плазменное и газоплазменное напыление.

В указанные схемы проведения процесса входит использование промежуточной операции — нанесения присадочного материала, что усложняет технологию.

Метод лазерной наплавки при подаче порошка в зону обработки одновременно с воздействием лазерного излучения. Формирование покрытия в этом случае отличается от такового при переплаве предварительно нанесенного шликерного слоя. Основное отличие заключается в том, что нагрев частицы начинается при попадании ее в луч и заканчивается на подложке. Оценочные расчеты показывают, что время, необходимое для нагрева частицы до температуры плавления, меньше времени ее нахождения в луче. Таким образом, оставшиеся частицы после проведения процесса наплавки могут быть использованы повторно.

Параметрами режима, влияющими на формирование наплавленных валиков при лазерной наплавке с принудительной подачей дополнительного присадочного материала, являются:

- 1) мощность лазерного излучения  $P$ ;
- 2) скорость наплавки  $v$ ;
- 3) величина расфокусировки  $\Delta F$ ;
- 4) массовый расход порошка  $G$ ;
- 5) расстояние, с которого вводят порошок  $L$ ;

- 6) угол ввода порошка  $\alpha$ ;
- 7) направление подачи порошка вслед или навстречу по отношению к направлению движения изделия;
- 8) расстояние от центра лазерного луча до центра ввода порошка.

*Лазерное напыление покрытий.* Лазерная наплавка заключается в нанесении на поверхность обрабатываемого изделия покрытия путем расплавления основы и присадочного материала. Причем поскольку основа подплавляется минимально, свойства покрытия главным образом зависят от свойств присадочного материала.

В настоящее время разработаны и широко применяются в промышленности различные способы наплавки металлов: электродуговая, плазменная, лазерная, газовая, наплавка ТВЧ, электроконтактная и т. д.

К процессу наплавки предъявляют следующие требования.

1. Обеспечение прочного и надежного сцепления основного и присадочного металлов.
2. Исключение образования пор и трещин.
3. Снижение остаточных напряжений и деформаций.
4. Уменьшение перемешивания металла основы с металлом наплавки.
5. Обеспечение проведения наплавки с минимальной глубиной проплавления основы.
6. Увеличение коэффициента использования присадочного металла.
7. Снижение стоимости процесса.
8. Повышение производительности и комфортности труда.

Основными недостатками традиционных способов наплавки являются: ухудшение свойств наплавленного металла из-за перемешивания с основным; деформация изделия, вызываемая высокими погонными энергиями; образование трещин в наплавленном слое; ограничения по сочетанию составов основного и наплавленного металлов; трудности при осуществлении наплавки малых поверхностей и изделий сложной формы.

По сравнению с традиционными способами лазерная наплавка обладает рядом преимуществ. Высокая концентрация энергии в пятне нагрева создает возможность проведения процесса при повышенных скоростях обработки. Это, в свою очередь, обуславливает:

формирование наплавленного слоя с малым коэффициентом перемешивания (0,05...0,15) в результате незначительного подплавления основы; минимальное термическое воздействие на основной металл, что особенно важно для материалов, претерпевающих структурные и фазовые превращения; малые остаточные деформации наплавленных деталей; возможность наплавки малых поверхностей, соизмеримых с диаметром пятна нагрева в случае применения импульсных и импульсно-периодическую лазеров; повышенные свойства наплавленных слоев.

Таким образом, малые деформации, с одной стороны, и высокие эксплуатационные свойства - с другой, создают предпосылки для применения этого способа не только для получения специальных свойств поверхности изделий, но и при изготовлении деталей машин.

Для лазерной наплавки используют те же наплавочные материалы, что и для традиционных методов. К ним относятся компактные присадки, выполненные в виде проволоки или ленты, и порошки.

В настоящее время широкое применение нашли наплавочные порошки на основе никеля. Их классифицируют как коррозионно-стойкие, жаростойкие, а также жаропрочные с карбидным и интерметаллидным упрочнением. Представителем таких сплавов являются порошковые присадочные металлы системы Ni—Cr—B—Si

Высокие технологические свойства порошковых материалов указанного состава также проявляются в их свойстве растворять оксидную пленку на поверхности основного

металла, хорошо смачивая ее. В результате легирования бором и кремнием в процессе наплавки происходит самофлюсование: при высоких температурах образуется стекловидное шлаковое покрытие, защищающее металл наплавки от взаимодействия с кислородом и азотом воздуха. Таким образом, при исследовании данных порошковых материалов специальная защита ванны расплава от отрицательного воздействия окружающей среды не требуется.

#### *Модуль 4 «Лазерная сварка металлов»*

*Особенности процесса лазерной сварки.* Лазерной сваркой называется технологический процесс получения неразъемного соединения частей изделия путем местного расплавления металлов по примыкающим поверхностям. В качестве источника нагрева используют концентрированный поток излучения лазера. В результате плавления и кристаллизации в прочное сцепление (сварной шов), основанное на межатомном взаимодействии.

Исходя из данного определения, лазерную сварку относят к методам сварки плавлением. Этот метод входит в группу методов сварки такими концентрированными источниками энергии, как сжатая дуга, плазма и электронный луч, отличающимися высокой плотностью энергии.

*Источники ЛИ. Теплофизические показатели лазерной сварки. Тепловые процессы.* В процессе плавления твердого тела и его перехода в жидкое состояние происходит нарушение дальних связей в решетке, которая теряет устойчивость при увеличении межатомных расстояний, вызванном тепловым расширением. Обычно плавление твердого тела имеет место при такой температуре  $T_{пл}$ , при которой амплитуда тепловых колебаний атомов относительно положения равновесия достигает значений примерно 0,2...0,3 межатомного расстояния. Как только температура поверхности металла достигнет точки плавления, возникает новый режим его нагревания, характеризующийся изменением оптических и теплофизических свойств среды и дополнительными затратами теплоты на плавление.

С использованием одномерной модели нагрева полубесконечного тела тепловым источником с постоянной во времени плотностью мощности потока было получено соотношение для расчета критической плотности потока, требуемой для достижения на поверхности металла температуры плавления  $T_{пл}$ :

$$E_1 = \frac{0.885 T_{пл} \lambda_T}{(\alpha \tau)^{1/2}}$$

где  $\lambda_T$  — коэффициент теплопроводности;  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности;  $\tau$  — длительность импульса.

Из данного выражения следует, что с повышением температуры плавления материала, его теплопроводности и объемной теплоемкости критическая плотность потока возрастает, а с увеличением продолжительности импульса излучения — уменьшается.

Процесс плавления материала под действием лазерного излучения зависит от распространения теплового потока в этом материале. Величина теплового потока в свою очередь зависит от теплопроводности материала  $\lambda_T$ . Однако тепловой поток определяется не только теплопроводностью, поскольку изменение температуры также зависит от удельной теплоемкости материала  $c$ . Скорость нагрева обратно пропорциональна удельной теплоемкости, рассчитанной на единицу объема материала, которая равна  $c\gamma$ , где  $\gamma$  — плотность материала.

Следовательно, основным параметром, определяющим критическое значение теплового потока, является коэффициент температуропроводности  $\alpha$ , вычисляемый по формуле

$$\alpha = \lambda_T / (c\lambda)$$

Величина  $\alpha$  входит в решение всех задач нестационарного распространения тепла и определяет, с какой скоростью происходит в материале передача тепловой энергии.

Глубину распространения температуры плавления приблизительно можно определить по следующему соотношению:

$$h = (4\alpha\tau)^{1/2}$$

На основании этого соотношения тепловую постоянную времени для пластины толщиной  $h$  вычисляют по выражению

$$\tau = h^2 / 4\alpha$$

Тепловая постоянная характеризует время, необходимое для того чтобы температура нижней поверхности пластины достигла температуры того же порядка, что и верхняя в результате нагрева коротким импульсом.

В целях обеспечения эффективного плавления выбранного металла длительность лазерного импульса должна примерно соответствовать тепловой постоянной времени этого металла определенной толщины.

С момента достижения на поверхности материала температуры плавления  $T_{пл}$  часть тепловой энергии рассеивается на испарение. Плотность потока, при которой температура поверхности достигает температуры испарения, можно определить по формуле:

$$E_2 = \frac{0.885T_k \lambda_T}{(\alpha\tau)^{1/2}}$$

где  $T_k$  — температура кипения материала.

При повышении плотности потока скорость испарения увеличивается и при некотором значении  $E_3$  становится равна скорости нагрева.

$$E_3 \cong \gamma L_{исп} (\alpha\tau)^{1/2}$$

Преимущества лазерного источника нагрева при сварке металлов малых толщин теплопроводным механизмом связаны с тем, что при сквозном проплавлении из-за отсутствия механического воздействия на расплавленную ванну исключаются провисание шва и как следствие прожоги и подрезы. В первую очередь это обусловлено тем, что поток фотонов лазерного луча не оказывает давления на поверхность расплава, тогда как, например, электрическая дуга обладает существенным давлением, на несколько порядков превышающим лазерное.

Энергетическое условие, при котором достигается лазерная сварка с минимальным испарением, определяется неравенством:

$$E_1 \leq E_{св} \leq E_2$$

При этом условии механизм образования сварного соединения можно представить следующим образом. Попадая на поверхность материала, лазерное излучение плотностью потока  $E_{св}$  частично поглощается, а частично отражается. В результате поглощения части энергии вследствие теплопроводности на поверхности формируется область расплава, размеры которой с течением времени увеличиваются. Фронт плавления при этом перемещается в глубь металла до тех пор, пока количество теплоты, подводимой в единицу времени из ванны расплава к границе раздела расплав-твердое тело, не станет равным количеству теплоты, отводимой в единицу времени в твердую фазу и затрачиваемой на фазовый переход. После прекращения действия излучения материал остывает до температуры кристаллизации.

*Методы лазерной сварки и их физические особенности. Классификация методов лазерной сварки.* Для эффективного проведения любого технологического процесса необходимо четко представлять его физическую сущность, знать энергетические параметры, определить технологические возможности и т. д. Особенностью лазерной сварки является широкий диапазон варьирования режимов, обеспечивающих не только возможность сварки различных материалов толщиной от нескольких микрон до десятков миллиметров, но и осуществление принципиально разных механизмов проплавления. Для ориентации в таком

многообразии технологических особенностей лазерной сварки удобно классифицировать их по определенным признакам.

Наиболее общими параметрами характеризующими энергетические признаки, являются плотность мощности  $E$ , Вт/см<sup>2</sup>, и длительность воздействия излучения  $\tau$ , с.

Плотность мощности, необходимая и достаточная для осуществления процессов сварки, находится в диапазоне  $10^5 \dots 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>. Нижний предел ограничен плотностью мощности менее  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, так как в данном случае более эффективны и экономичны другие методы сварки, например дуга или газовое пламя. Верхний предел связан с развитием интенсивного испарения, что приводит к выбросу металла и возникновению дефектов сварного шва.

Под длительностью воздействия понимается продолжительность времени экспозиции при непрерывном излучении и длительность импульса при импульсном излучении.

Для осуществления того или иного технологического процесса лазерной сварки необходимо определенное сочетание плотности мощности с длительностью воздействия излучения на материал.

Первая группа — плотность мощности  $E = 10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, длительность воздействия  $\tau > 10^{-2}$  с. Этот диапазон режимов сварки достигается непрерывным лазерным излучением с различными длинами волн. Длительность воздействия в данном случае определяется отношением диаметра сфокусированного луча к скорости сварки:

$$\tau = d / v_{ce}$$

Вторая группа — плотность мощности  $E = 10^6 \dots 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>, длительность воздействия  $\tau < 10^{-3}$  с. В данном диапазоне режимов используется импульсно-периодическое лазерное излучение. Сочетание высокой плотности мощности с импульсным многократным воздействием излучения позволяет осуществлять сварку с повышенной эффективностью проплавления.

Третья группа — плотность мощности  $E = 10^5 \dots 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, длительность воздействия  $10^{-3} \leq \tau \leq 10^{-2}$  с. Подобные условия создаются отдельными импульсами с длительностью в указанном диапазоне. Объем расплавленного металла определяется временем воздействия импульса.

Сварку подразделяют на две основные группы: сварку малых толщин и сварку с глубоким проплавлением.

К первой группе технологических признаков относятся способы, используемые для сварки материалов малых толщин, т. е. толщин менее 1,0 мм. Принципиальным отличием этих способов является сварка при режимах, обеспечивающих только плавление материала без его интенсивного испарения. В этом случае применяют как непрерывный, так и импульсный режим излучения

При непрерывном режиме излучения используют газовые и твердотельные лазеры мощностью излучения до 1,0 кВт. Импульсный режим осуществляется в основном твердотельными лазерами с энергией излучения от нескольких единиц до десятков джоулей. Материалы малых толщин можно сваривать непрерывными швами и отдельными точками. При непрерывном излучении используют шовную сварку, а при импульсном — как шовную, так и точечную. Шов в данном случае формируется как перекрытие отдельно действующих точек, его сплошность зависит от степени перекрытия.

При технологической необходимости для перекрытия зазора, исправления дефектов, дополнительного легирования и других целей может быть применена сварка с присадкой. Диаметр присадочной проволоки должен быть менее 1,0 мм, она должна направляться в зону сварки с отклонением не более 0,1 мм. В отдельных случаях возможно использование присадочного порошка. В большинстве случаев сварку осуществляют без присадки, при необходимости делают отбортовку кромок.

Сварку деталей одинаковой толщины выполняют импульсно или в непрерывном режиме со сквозным проплавлением. При сварке внахлестку тонких деталей с массивными можно применять несквозное проплавление массивной детали, при этом тонкая деталь

проплавляется насквозь. Кроме того, несквозное проплавление можно использовать для скрепления двух массивных деталей при небольших нагрузках в процессе эксплуатации или для обеспечения герметичности.

Под лазерной сваркой с глубоким проплавлением понимается сварка материала толщиной более 1,0 мм. Процесс можно проводить как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме излучения лазера. При непрерывном излучении с помощью особого механизма проплавления можно получить узкие глубокие швы при скорости процесса 1...9 м/мин. Для сварки этим методом применяют мощные газовые лазеры непрерывного излучения или мощные твердотельные Nd:YAG-лазеры. В основном используют шовную сварку по различным геометрическим контурам.

Сварка с глубоким проплавлением в импульсно-периодическом режиме отличается более высокой энергетической эффективностью проплавления по сравнению с непрерывным режимом сварки. Однако скорость сварки в этом случае на порядок меньше.

Практически во всех случаях сварка осуществляется с защитой шва от окисления. Защитные среды и средства защиты весьма разнообразны.

При проектировании или внедрении того или иного технологического процесса для интенсификации производства в современных условиях требуется учет ряда экономических показателей. Лазерная сварка характеризуется несколькими существенными экономическими признаками, от которых зависит эффективность рассматриваемых методов.

Одним из таких признаков является время проведения процесса сварки. Производительность процесса определяется скоростью его проведения. Такие методы лазерной сварки, как сварка непрерывным излучением, обладают исключительно большими скоростями — вплоть до 10...11 м/мин. Применение таких скоростей позволяет увеличить производительность по сравнению с производительностью традиционных методов сварки плавлением в 10-15 раз.

Другим экономическим признаком является экономия материала. При массовом производстве деталей с большой протяженностью шва и глубиной проплавления 5...20 мм из-за отсутствия необходимости разделки кромок и использования присадочной проволоки эта экономия может быть существенной.

Возможность концентрации луча в пятно диаметром до 0,1 мм позволяет использовать такой экономический признак, как локальность обработки. В этом случае осуществляется экономное проектирование деталей с учетом сварки в крайне узкой зоне, а также в труднодоступных местах.

Внедрение мощных твердотельных Nd:YAG-лазеров, а также диодных лазеров позволяет роботизировать процесс лазерной сварки путем передачи излучения по световоду к месту сварки и перемещения в различных пространственных положениях сварочной головки. Это дает возможность резко повысить экономическую эффективность лазерной сварки и в отдельных случаях делает ее даже выгоднее, чем дуговую или плазменную.

*Преимущества и особенности процесса лазерной сварки.* Среди методов сварки металлов лазерная сварка занимает особое место, отличаясь спецификой воздействия на материал источника нагрева и возможностью изменения плотности мощности вводимой энергии в широких пределах (от  $10^3$  до  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>).

Преимущества лазерной сварки перед дуговой в основном заключаются в следующем:  
1. За счет высокой концентрации энергии и малой площади пятна нагрева объем сварочной ванны при лазерной сварке в несколько раз меньше. Этот фактор положительно сказывается на ряде характеристик как сварного шва, так и изделия в целом. Малый объем расплавленного металла и специфическая форма шва также улучшают условия кристаллизации, что повышает технологическую прочность и механические свойства сварных соединений.

2. Отсутствие электрода, близко расположенного к поверхности сварочной ванны, исключает попадание в нее инородных материалов, что практически во всех случаях имеет место при дуговой сварке.
3. Острая фокусировка луча и возможность передачи его на значительные расстояния позволяют осуществлять сварку в труднодоступных местах, например в углублениях гофрированных конструкций, внутренних полостей и т. л.
4. Жесткий термический цикл с высокими скоростями нагрева и охлаждения дает возможность при лазерной сварке по сравнению с дуговой существенно уменьшить зону термического влияния.
5. Большие скорости сварки (до 9...11 м/мин) обеспечивают высокую производительность процесса, в десятки раз превышающую производительность дуговой сварки.
6. Использование передачи энергии по световоду при сварке твердотельными Nd:YAG-лазерами позволяет роботизировать процесс и проводить его в различных пространственных положениях.

В совокупности все эти преимущества в отдельных случаях, например при массовом изготовлении кузовов автомобилей, делают лазерную сварку экономически более выгодной, чем дуговую, несмотря на высокую стоимость лазерного оборудования.

Сравнение лазерной и электронно-лучевой сварки показывает, что во многом эти два метода взаимозаменяемы. Однако существует несколько особенностей, которые выгодно отличают лазерную сварку и дают ей определенные преимущества.

1. Для осуществления процесса лазерной сварки не требуется обязательного наличия вакуумных камер или камер с контролируемой атмосферой.

2. Существенные трудности возникают при сварке электронным лучом широко распространенных сталей перлитного и мартенситного класса толщиной более 30 мм из-за отклонения электронного луча от стыка соединяемых деталей. Основной причиной этого дефекта является остаточная намагниченность ферромагнитных сталей. Сварка электронным лучом в магнитном поле приводит к отклонению его от стыка. Использование для подобных целей лазерного луча полностью исключает образование указанного дефекта, так как поток фотонов с магнитным полем не взаимодействует.

3. Процесс электронно-лучевой сварки практически не может быть роботизирован и использован для сварки объемных деталей в различных пространственных положениях.

Необходимо отметить некоторые преимущества лазерной точечной сварки перед контактной.

1. Размер сварной точки при лазерной сварке существенно меньше, чем при контактной, что дает возможность соединять миниатюрные детали.

2. Механическое давление при получении сварной точки отсутствует, что позволяет соединять хрупкие и легкодеформируемые детали.

3. Время получения одной точки при лазерной сварке составляет  $10^{-2}...10^{-3}$  с, тогда как при контактной оно равно 0,5...1 с, т. е. производительность лазерного луча в сотни раз выше.

4. Сварку можно проводить не только в труднодоступных местах, но и через прозрачные среды в замкнутых объемах, что контактной сваркой осуществить принципиально невозможно.

5. Использование материалов с резко отличающимися физическими свойствами и в первую очередь с различным электрическим сопротивлением.

Следует также учитывать и социальные преимущества, связанные с лазерной технологией в целом, а именно: повышение эффективности и культуры производства; уменьшение затрат ручного труда; престижность новой профессии; экологичность внедрения лазерной технологии. Применение такой технологии снижает уровень производственного травматизма и профзаболеваний.

Наряду с рассмотренными преимуществами лазерная сварка имеет некоторые особенности, затрудняющие ее универсальное применение по сравнению с существующими традиционными методами.

1. Прежде всего это высокая стоимость лазерного оборудования и оснастки.
2. Невысокая энергетическая эффективность лазерной сварки, так как КПД лазерных установок в редких случаях превышает 10 %.
3. Сложность устройств лазерной техники, что требует высокого уровня технической подготовки обслуживающего персонала.

Указанные особенности ограничивают использование лазерной сварки теми областями, где их применение бесспорно.

*Физические особенности образования сварного шва при сварке материалов малых и больших толщин.* Образование сварного соединения сопровождается рядом физических процессов, оказывающих влияние как на механизм проплавления, так и на качество.

Согласно существующим представлениям, данный процесс условно можно разделить на следующие стадии: поглощение света и передача энергии тепловым колебаниям решетки твердого тела, нагревание металла без разрушения, плавление, разрушение материала в результате испарения и выброса расплава, остывание металла после окончания воздействия импульса. Рассмотрим эти стадии подробнее.

Попадая на поверхность свариваемых материалов, лазерное излучение частично поглощается поверхностью, а частично отражается. Использование лазерной энергии для сварки основано на поглощении излучения веществом, Проникновение излучения в материал можно описать экспоненциальным законом Бугера—Ламберта.

В результате перехода энергии лазерного излучения в теплоту начинается нагрев материала. При этом перенос теплоты в твердое тело происходит в результате теплопроводности. При использовании металлов наиболее существенное значение имеет электронная теплопроводность. Размеры прогретой области вначале определяются глубиной проникновения излучения в среду, затем, с течением времени, вследствие теплопроводности они возрастают, т. е. осуществляется теплопроводностный механизм.

Повышение температуры материала сопровождается изменением его оптических и тепло-физических свойств, тепловым расширением, а также фазовыми переходами в твердом состоянии и плавлением. В ряде случаев при нагревании активизируются не только диффузионные процессы в твердом теле, но и некоторые химические реакции на его поверхности и в приповерхностных слоях.

С увеличением температуры поверхности коэффициент отражения уменьшается, а поглощательная способность увеличивается.

Для сварки металлов малых толщин особое значение имеет стадия плавления материала.

Для проведения лазерной сварки материалов толщиной более 1,0 мм требуются существенно большие затраты концентрированной энергии, чем при сварке металлов малых толщин. В связи с этим физические процессы, сопровождающие образование сварного соединения, и механизм проплавления также принципиально отличаются.

Особенностью сварки мощными концентрированными источниками энергии (лазерным и электронным лучом) является получение так называемого «кинжального» проплавления, характеризующегося высокими значениями коэффициента формы шва, определяемого по формуле:

$$k = H / B$$

где  $H$  — глубина проплавления;  $B$  — ширина шва.

При глубоких проплавлениях этот коэффициент всегда больше 1, но может достигать значений 10 и более.

Следует отметить, что до применения концентрированных источников энергии для сварки получить подобные формы проплавления за один проход было принципиально невозможно.

Подобный эффект, естественно, привлек внимание исследователей, а его изучение стало одной из основных задач при исследовании процессов воздействия концентрированными источниками энергии на материал.

Физическую модель образования «кинжального» проплавления при сварки непрерывным лазерным излучением можно сформулировать следующим образом. В результате попадания лазерного излучения с определенной критической плотностью на поверхность материала происходит его нагрев со скоростью, существенно превышающей скорость отвода теплоты вследствие теплопроводности, конвекции и обратного излучения. При этом начинается локальное испарение и на поверхности формируется лунка, которая при достаточной мощности источника развивается в глубь материала, что приводит к образованию канала заполненного парами материала. Взаимодействие давления паров материала, гидростатических сил окружающего жидкого металла и сил поверхностного натяжения препятствуют закрытию канала. При некоторой скорости относительного перемещения луча и обрабатываемого участка канал приобретает динамическую устойчивость и распространяется в глубь материала. На передней стенке канала происходит плавление материала, который по боковым стенкам переносится на заднюю стенку, где и затвердевает. При наличии канала лазерное излучение проникает в материал на некоторую глубину. При этом образуется узкий шов с большим отношением глубины к ширине.

Энергетическим условием начала «кинжального» проплавления так же, как и при сварке металлов малых толщин, является превышение значения  $E_{св}$  над  $E_3$ . Однако с учетом непрерывности воздействия и большой мощности излучения это превышение должно быть таким, чтобы процесс испарения имел взрывной характер.

Для оценки критической мощности  $E'_3$  перехода к «кинжальному» проплавлению необходимо знать характерное время энергонакопления  $\tau$ , по достижении которого происходит взрывное вскипание некоторого объема металла.

В общем случае  $\tau$  зависит от  $E_2$  и физических свойств материала. Точно определить время энергонакопления можно только при рассмотрении динамики всего процесса с учетом испарения. Оно складывается из времени  $\tau_1$  требуемого для нагрева материала до температуры кипения, и времени  $\tau_2$  необходимого для развития взрывного вскипания. Функционально его можно записать следующим образом:

$$T = \tau (E_{св}, \lambda, c, L_{пл}, L_{исп}, A)$$

где  $A$  — поглощательная способность вещества.

Время энергонакопления для различных металлов в зависимости от их теплофизических свойств может составлять от единиц до сотен микросекунд.

Так как для большинства металлов  $L_{пл} \ll L_{исп}$ , а  $\tau_2 \gg \tau_1$ , с применением теории подобия можно получить формулу для оценки критического значения плотности потока начала «кинжального» проплавления:

$$E'_3 = A^{-1} \gamma L_{пл} \sqrt{\frac{\alpha}{\tau}}$$

Эта формула справедлива для поверхностного источника теплоты, ее также (с точностью в пределах одного порядка) можно использовать и для объемного источника.

Помимо поверхностного испарения при лазерном воздействии с плотностью потока  $E_{св} > E_3$  происходит объемное парообразование. Механизм объемного парообразования существенно отличается от поверхностного испарения. Этот процесс обусловлен тем, что в реальных металлах содержится определенное количество дефектов в виде газовых и усадочных раковин, пор, скоплений, примесей, неметаллических включений и растворенных газов.

Одновременно с началом образования канала над поверхностью материала образуется светящийся факел, состоящий из продуктов испарения и выброса, а также частиц конденсированного пара. При определенных условиях в результате действия этого факела интенсивность излучения, сфокусированного на поверхности образца, из-за его поглощения и дефокусировки, может снижаться.

Плазменный факел препятствует прохождению лазерного излучения на поверхность материала (экранирует его). Степень экранировки зависит от толщины плазменного облака  $l$  и коэффициента поглощения плазмой лазерного излучения по оси луча. Прозрачность облака

определяется коэффициентом прозрачности  $\eta$ , т. е. отношением мощности излучения, прошедшего через факел, к мощности лазера, по зависимости:

$$\eta = \exp(-l\alpha)$$

где  $l$  — толщина плазменного облака;  $\alpha$  — коэффициент поглощения плазмой лазерного излучения.

Прозрачность разряда зависит от мощности сфокусированного излучения и рода газа, в среде которого происходит разряд.

С увеличением мощности прозрачность факела резко снижается. Кроме того, использование различных газовых сред, например воздуха и аргона, также может приводить к изменению рассматриваемых параметров.

Формирование сварного соединения: в материале при воздействии излучения с плотностью мощности больше критической образуется сварочная ванна характерной формы, очерченной фазовой границей твердого и расплавленного металла. В головной части ванны расположена наиболее устойчивая область яркого свечения. Эта область представляет собой канал, или кратер, заполненный парами металла. Углубление канала происходит постоянно до некоторого значения, определяемого уровнем подводимой энергии со скоростью 100...200 мм/с. Яркость свечения разных участков канала различна. На передней по направлению движения стенке яркость свечения выше, чем на задней, что свидетельствует о преимущественном выделении энергии на передней стенке. Поскольку диаметр луча значительно меньше среднего диаметра канала, на заднюю стенку могут попадать только лучи, отраженные от передней стенки. Как правило, передняя стенка наклонена под углом к действию луча; ее нижняя часть имеет искривленную форму, находящуюся вне прямого попадания излучения, т. е. нагрев в этой области осуществляется отраженным излучением от задней стенки. В результате прямого воздействия сфокусированного излучения, а также переотражения и теплового воздействия паров передняя стенка канала приобретает такую устойчивую форму, при которой на каждый ее элемент приходится энергия, достаточная для расплавления. На передней стенке существует слой расплавленного металла, на который воздействуют силы давления паров. В результате этого наблюдается искривление жидкого слоя в виде ступеньки, которая периодически перемещается по высоте канала. Удаление расплавленного материала с передней стенки осуществляется послойно при перемещении ступеньки сверху вниз.

Задняя стенка имеет неустойчивую форму; количество расплавленного металла на ней значительно больше, чем на передней. Поверхность фронта кристаллизации на задней стенке характеризуется наличием выступа (рис. 7.1) твердой фазы, который разделяет ванну на две части: нижнюю, сильно заглубленную и узкую в поперечном сечении, и верхнюю — более широкую и вытянутую вдоль шва. Наличие второго участка обусловлено процессами теплопроводности.

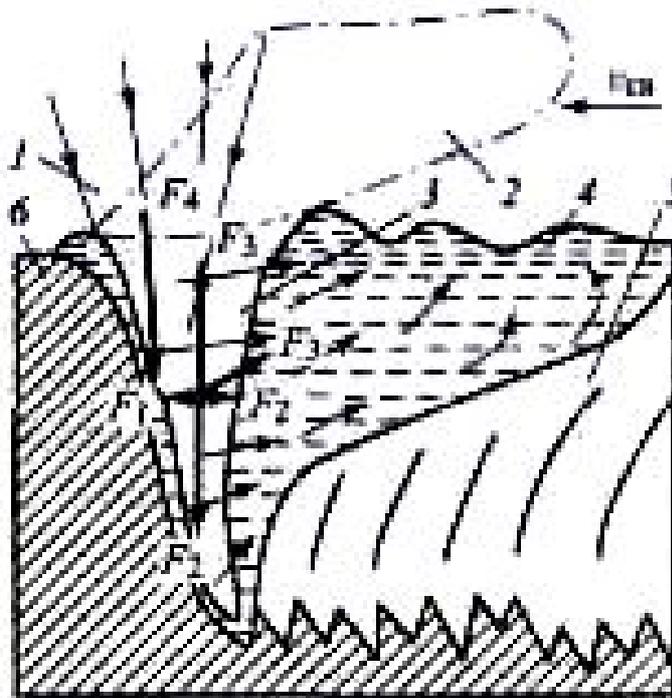


Рис. 7.1 Схема продольного сечения сварочной ванны

1- лазерный луч; 2 — плазменный факел; 3 — парогазовый канал; 4- хвостовая часть сварочной ванны; 5 - закристаллизовавшийся металл; 6- свариваемый материал.

Визуальные наблюдения показали, что сварочная ванна постоянно находится в движении, что приводит к изменению формы канала.

Механизм процесса лазерной сварки связан с динамикой массо- и теплообмена между паровой, жидкой и твердой фазами в сварочной ванне, а также оптическими и плазменными процессами в паровом канале и в газовой среде над ним.

Одним из основных условий получения сварного соединения требуемого качества является сохранение формы (устойчивость) канала в промежутки времени, при котором обеспечивается максимальное проплавление. Очевидно, что чем дольше существует открытый канал, тем больше глубина проплавления. Устойчивость канала определяется балансом сил, действующих на поверхность боковых стенок:

$$F_1 = F_2 + F_3,$$

где  $F_1$  - сила давления пара в канале;  $F_2$  - сила гидростатического и атмосферного давления, действующая на расплавленный металл;  $F_3$  - сила поверхностного натяжения на стенках канала.

В случае повышенного давления в канале ( $F_1 > F_2 + F_3$ ) металл будет вытесняться на поверхность и образования соединения не произойдет. Если же ( $F_1 < F_2 + F_3$ ) могут произойти преждевременное закрытие канала расплавленным металлом и прекращение его дальнейшего углубления.

Сила  $F_1$  возникает в результате испарения металла в канале и создания определенного уровня давления, действующего на боковые стенки, покрытые слоем расплавленного материала. Эта сила складывается из двух составляющих:

$$F_1 = F_p + F_c$$

где  $F_p$  — сила реакции паров с боковых стенок канала;  $F_c$  — сила статического давления пара.

Сила  $F_2$  обусловлена наличием жидкого металла на стенках канала, который стекает вниз и может перекрыть канал. Гидростатическое давление является функцией плотности жидкого металла и высоты его столба над рассматриваемым уровнем. Возникающую при этом силу можно определить по формуле

$$F_2 = \gamma g H \frac{\pi}{4} d^2,$$

Где  $\gamma$  – плотность жидкого металла,  $g$  – ускорение свободного падения,  $H$  – глубина канала,  $d$  – диаметр канала.

Наличие силы поверхностного натяжения  $F_3$  связано тем, что жидкие вещества обладают свойством сокращать площадь своей поверхности, в результате чего расплавленные металлы стремятся приобрести сферическую форму и уменьшить удельную свободную энергию поверхности. Вследствие этого жидкость стремится сжаться в канале, т.е. перекрыть его, оказывая тоже действие, что и сила  $F_2$ . Силу поверхностного натяжения:

$$F_3 = \pi d \sigma$$

Помимо указанные выше сил существует сила, способствующая углублению канала, от величины которой в определенной степени зависит глубина проплавления. Это вертикальная составляющая сила реакции паров  $F_4$ , выходящих из канала. Возникновение этой силы связано с кинетикой движения паров, удаляющихся с поверхности расплавленного металла и выходящих из канала с достаточно большой скоростью.

Обобщенные представления о переносе металла можно сформулировать следующим образом. Перенос расплавленного металла из головной части в хвостовую преимущественно происходит по боковым стенкам канала в горизонтальном направлении. При этом по мере углубления канала наблюдаются восходящие потоки движения металла. По передней стенке металл движется сверху вниз и через дно канала выталкивается на заднюю стенку; кроме того, небольшое количество металла выдавливается на поверхность по передней стенке. В хвостовой части металл завихряющимися потоками поднимается вверх, его часть выносится на поверхность сварочной ванны и в результате волнового движения перемещается в периферийную область, где кристаллизуется.

Основной силой, действующей на металл и обеспечивающей его перенос, является сила реакции паров. Одновременно с силами реакции паров на перенос металла также влияют силы поверхностного натяжения, возникающие вследствие разницы температур па передней и задней стенках канала.

Анализ рассмотренных особенностей механизма формирования сварного соединения при лазерной сварке дает возможность объяснить причины образования некоторых специфических дефектов швов, возникающих в ходе этого процесса, а также наметить принципиальные способы их устранения.

Наиболее распространенными дефектами швов значительных размеров являются пустоты, которые нельзя отнести к пористости. Эти пустоты обусловлены наличием перемычек в канале, образованных при неравномерном переносе металла с передней стенки на заднюю. Перемычки могут возникнуть из-за наличия на задней стенке перегибов вследствие воздействия на нее избыточного давления пара. Избыточное давление вызвано интенсивным испарением материала при воздействии отраженного от передней стенки потока лучистой энергии. Другим распространенным дефектом сварного шва является периодическое изменение глубины проплавления по его длине, что выражается в образовании зубцов. Периодическое изменение глубины проплавления обусловлено колебаниями объема жидкого металла сварочной ванны в области кристаллизации.

*Основы технологии лазерной сварки. Лазерная сварка материалов малых толщин.* Сварку материалов малых толщин можно осуществлять как импульсным, так и непрерывным излучением лазера. Наиболее широко распространена импульсная лазерная сварка.

В процессе разработки технологии сварки необходимо знать основные параметры режимов процесса, их взаимосвязь и влияние на критерии, определяющие качество сварного соединения. При выборе режимов любого технологического процесса и, в частности, лазерной сварки, оптимизация параметров режимов по критериям качества является главной задачей.

К основным параметрам импульсной лазерной сварки относятся энергия импульса, длительность импульса, диаметр сфокусированного луча, положение фокального пятна относительно свариваемой поверхности (степень расфокусировки) и скорость сварки.

Кроме того, в случае применения таких технологических приемов, как защита шва от окисления, дополнительное легирование или подача присадочного материала, сканирование луча и некоторых других, также используют и дополнительные параметры.

Критерии качества сварных соединений весьма разнообразны и зависят от технических требований к изделию. Наиболее общими критериями считаются геометрия сварного шва, или размеры литой зоны, механические свойства соединений, технологическая прочность, отсутствие внутренних и внешних дефектов, химический состав и структура шва.

*Параметры режимов сварки.* Рассмотрим подробнее указанные выше параметры режимов и их взаимосвязь с критериями качества в целях оптимизаций технологии импульсной лазерной сварки.

Энергия импульса — основной энергетический параметр, определяющий процесс сварки. Он влияет как на общее количество теплоты, поступившее в зону обработки, так и на некоторые характеристики излучения (длительность импульса, его структуру и расходимость). Энергия измеряется в джоулях и обозначается  $W$ . Энергию импульса, необходимую для расплавления металла без выплеска, ориентировочно можно оценить по формуле

$$W = \frac{0.885T_{пл} \lambda_l \tau \pi r^2}{\sqrt{\alpha \tau}}$$

где  $\tau$  — длительность импульса;  $r$  — радиус сфокусированного пучка.

Длительность импульса характеризует время воздействия излучения на материал и, следовательно, является временем, в течение которого происходят нагрев и расплавление металла. При повышении мощности путем сокращения длительности импульса достигается большая глубина проплавления, но количество испарившегося вещества при этом возрастает. Поэтому область значений длительности импульса при фиксированной энергии излучения должна иметь ограничения как по минимуму, так и по максимуму.

Наиболее оптимальной формой импульса излучения при сварке является трапецеидальная или треугольная с относительно крутым передним и пологим задним фронтом.

Диаметр сфокусированного луча влияет как на площадь обработки, так и на плотность мощности  $E$  ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ), которая зависит от него следующим образом:

$$E = \frac{4W}{\pi d^2 \tau}$$

При выборе диаметра сфокусированного луча следует учитывать соотношение необходимой площади нагрева с плотностью мощности, требуемой для получения заданной глубины проплавления.

Расфокусировку излучения широко применяют для регулирования плотности мощности в световом пятне и его диаметра. При этом поверхность свариваемых деталей располагают выше или ниже фокальной плотности объектива, где сфокусированный световой пучок имеет наименьший диаметр. Используя расфокусировку при сварке, следует иметь в виду, что при расположении поверхности деталей над фокальной плоскостью в случае прогиба сварочной ванны плотность мощности на ее поверхности увеличивается и испарение становится более интенсивным. Это может привести к нежелательным результатам.

Скорость сварки рассматривают при сварке деталей малых толщин только при шовной сварке. В случае импульсного режима шов образуется в результате наложения сварных точек (с некоторым перекрытием). В зависимости от назначения сварного соединения коэффициент перекрытия может находиться в пределах 0,3-0,9. Для вакуумных швов он должен быть не менее 0,5. Скорость шовной импульсной сварки определяется диаметром сварных точек  $d$ , коэффициентом их перекрытия  $k$  и частотой следования

импульсов:

$$v_{ce} df(1-k)$$

*Взаимосвязь параметров режима сварки с критериями качества.* Рассмотренные ранее основные параметры режима комплексно влияют на качество сварного соединения.

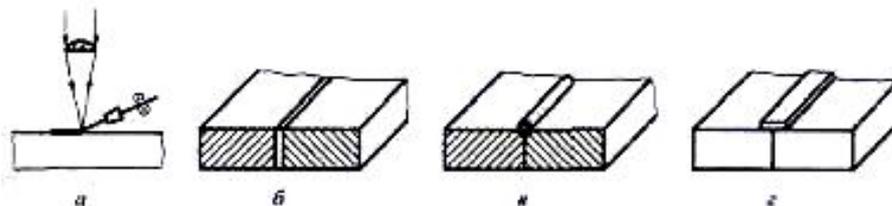
Геометрия сварного шва, или размеры литой зоны (глубина и диаметр проплавления), прежде всего зависят от энергии, затраченной на нагрев, времени, в течение которого этот нагрев осуществляется, и диаметра пятна излучения на поверхности свариваемых деталей. Для различных материалов с отличающимися теплофизическими свойствами при одних и тех же характеристиках излучения размеры литой зоны неодинаковы.

Критерием качества сварки также является прочность соединения, которая непосредственно связана с размерами литой зоны. При увеличении энергии прочность вначале возрастает, что обусловлено увеличением глубины и диаметра зоны проплавления. При определенном значении энергии плотность мощности оказывается достаточной для выброса части расплавленного металла из сварочной ванны в результате интенсивного испарения. Площадь сечения литой зоны, а также прочность при этом начинают уменьшаться.

Размеры зоны термического влияния могут быть уменьшены путем обдува места сварки защитным газом — аргоном или гелием. Струйная защита локализует зону нагрева. Защита шва также оказывает позитивное влияние на качество литой зоны, так как позволяет избежать ее окисления.

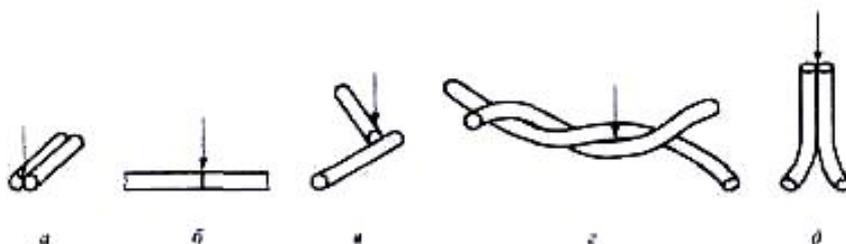
Для повышения прочности сварных соединений, а также устранения занижения шва и зазоров используют присадочный материал. Применение присадки также дает возможность изменить химический состав швов, что положительно влияет на его технологическую прочность.

Присадочный материал используют в виде подачи проволоки или ленты, а также в виде порошков. Существует несколько схем подачи присадочного материала в зону плавления при импульсной лазерной сварке.



Способы ввода присадочного материала в виде:  
а — проволоки; б — прокладки; в, г — накладки

Наиболее рациональным является параллельное соединение проволок. Особенность сварки такого типа соединения заключается в образовании между соприкасающимися цилиндрическими поверхностями клиновидного зазора. Такой зазор выполняет функцию «светоловушки». Излучение, падая на цилиндрическую поверхность под большим углом, отражается от нее, попадая на противоположную цилиндрическую поверхность. При многократном отражении излучение практически полностью поглощается в металле шва.



Типы сварных соединений проволоки:

а – параллельное соединение; б — сварка встык; в — угловое соединение; г – соединение скрещивающихся проволок; д — торцевое соединение

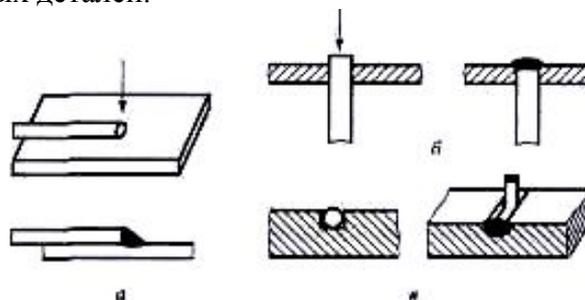
При сварке проволоки *встык* диаметр светового пятна выбирают примерно равным диаметру проволоки. Если материал обеих проволок одинаков, то центр светового пятна совмещают с плоскостью стыка. При сварке разнородных металлов центр светового пятна смещают в сторону проволоки из металла, имеющего более высокую теплопроводность, температуру плавления и коэффициент отражения. В процессе нагрева излучением концы проволок оплавляются. Под действием сил поверхностного натяжения расплавленный металл стягивается в две капли, которые затем объединяются в одну, образуя между свариваемыми проволоками жидкий «мост».

Не представляет особых трудностей получение *угловых* и *торцевых соединений проволок*. В этих случаях между цилиндрической поверхностью одной из проволок и торцом другой также возникает клиновидный зазор — «светоловушка», что позволяет повысить эффективность использования излучения.

Кроме того, возможно соединение *скрещивающихся проволок*. При этом излучение целесообразно направлять в область их контакта. Если параметры излучения подобраны так, что при нагреве образуется общая для обеих деталей сварочная ванна, то появляется возможность получения сварного соединения двух скрещивающихся проволок, оси которых находятся в одной плоскости. Для этого в процессе сварки с помощью приспособлений необходимо обеспечить некоторое давление проволок друг на друга. Под действием этого давления за время существования общей сварочной ванны проволоки смещаются и их оси оказываются в одной плоскости.

В процессе сварки *торцов проволок* диаметр светового пятна должен быть равен двум диаметрам проволоки. Зазор между проволоками не должен превышать 0,1 мм.

При сварке проволоки с массивной деталью *внахлест* необходимо обеспечить плотное сжатие свариваемых деталей.



Типы соединений проволоки с массивными деталями:

*а* — сварка внахлест; *б* — сварка при размещении проволоки в отверстии; *в* — сварка

Диаметр светового пятна выбирают большим или равным диаметру проволоки. Излучение следует направлять одновременно как на проволоку, так и на деталь, если их материалы имеют равные или близкие значения теплофизических свойств, либо только на проволоку, если ее материал имеет большую температуру плавления, теплопроводность и коэффициент отражения.

Наиболее надежно и просто выполняются соединения проволоки с массивной деталью, толщина которой значительно больше диаметра проволоки, при *укладке ее в отверстия или в пазы*. При установке проволоки в технологическое отверстие диаметр светового пятна выбирают равным или несколько большим диаметра проволоки. Рекомендуется устанавливать проволоку в отверстие так, чтобы ее конец выступал над поверхностью на 0,3-0,5 от ее диаметра.

*Лазерная сварка металлов с глубоким проплавлением.* Данная технология отличается от технологии сварки малых толщин физическим механизмом проплавления и специфической геометрией сварного шва. В частности, диапазон свариваемых толщин при использовании этого метода значительно увеличивается (от 1,0 до 30...40 мм за один проход), что существенно расширяет область его применения.

Основными параметрами режимов лазерной сварки с глубоким проплавлением являются мощность лазерного излучения  $P$ , скорость сварки  $v_{CB}$ , фокусное расстояние  $F$  и положение фокуса относительно поверхности свариваемых материалов  $\Delta F$ .

Мощность излучения  $P$ , Вт — это тепловой параметр, определяющий воздействие непрерывного лазерного излучения на материал в процессе сварки. В технологии лазерной сварки под мощностью понимают излучение, замеренное перед фокусирующей системой.

Мощность излучения а первую очередь влияет на проплавляющую способность и характер формирования шва. Скорость сварки  $v_{CB}$ , м/мин, определяет путь, пройденный источником нагрева относительно поверхности материала в единицу времени. При одной и той же мощности скорость сварки характеризуется диапазоном, минимальное значение которого ограничено отсутствием «кинжального» проплавления, а максимальное — тем, что металл кристаллизуется до момента достижения качественного сплавления, а также образованием дефектов в виде подрезов, пор, непроваров и др.

Скорость сварки влияет на распространение тепла в сварном соединении. Из теории тепловых процессов известно, что с увеличением скорости сварки площади областей вокруг источника нагрева, имеющие определенную температуру, уменьшаются, а соответствующие изотермы сужаются в направлении, перпендикулярном оси шва, и сгущаются перед источником. От скорости сварки в значительной степени зависят геометрия проплавления, структура шва и околошовной зоны, а также свойства и химический состав сварных соединений.

Параметры фокусирующей системы, оказывающие влияние на качество сварных соединений, характеризуются диаметром сфокусированного пятна, фокусным расстоянием линзы или объектива, углом сходимости луча, конструкцией фокусирующей системы.

Оптимальный диаметр сфокусированного пятна находится в диапазоне от 0,5 до 1,0 мм. Это объясняется тем, что при диаметре пятна менее 0,5 мм плотность мощности слишком велика, металл интенсивно перегревается и шов формируется с образованием большого количества внутренних и внешних дефектов. При диаметре пятна более 1,0 мм эффективность лазерного луча как концентрированного источника снижается.

Фокусные расстояния линз  $F$ , мм, используемые для практических целей, находятся в диапазоне 100...250 мм. Нижний предел выбирают таким образом, чтобы можно было исключить интенсивное забрызгивание или запыление линзы. Верхний предел ограничен возникновением аберраций и снижением эффективности проплавления.

Угол сходимости луча определяется фокусирующей системой, на практике он составляет от 5 до 50°.

Кроме параметров, непосредственно задаваемых при проведении технологического процесса, существуют производные параметры, характеризующие взаимодействие основных. К таким параметрам относятся погонная энергия и плотность мощности.

Погонной называется энергия излучения, расходуемая на расплавление элементарного объема металла единицы длины шва. Ее можно рассчитать по формуле

$$Q = P/v_{CB}$$

Использование понятия погонной энергии не всегда справедливо для концентрированных источников энергии, так как при постоянной погонной энергии из-за различной плотности мощности можно получить разное проплавление.

Под плотностью мощности понимают отношение мощности излучения к площади пятна нагрева

$$E = 4P/(nd^2),$$

Рассмотренные параметры используют в технологии наряду с основными.

С увеличением мощности излучения эффективность действия луча повышается. При этом глубина проплавления  $h$  и ширина  $B$  шва также увеличиваются. При средних уровнях мощности и больших скоростях сварки (около 2 м/мин) глубина проплавления возрастает пропорционально мощности излучения. В случае уменьшения скорости сварки или существенного повышения мощности эта зависимость становится отличной от прямолинейной.

Для приближенной оценки глубины проплавления также можно использовать эмпирические формулы, полученные в результате статистической обработки экспериментальных данных. Взаимосвязь основных параметров сварки с относительной глубиной проплавления приближенно можно рассчитать по формуле:

$$h = \frac{P}{2\pi\lambda_T T_k} \ln \frac{r_l + \alpha / v_{св}}{r_l}$$

где  $\lambda_T$  — коэффициент теплопроводности материала;  $T_k$  — температура кипения;  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности материала.

Помимо рассмотренных выше основных параметров на показатели качества существенное влияние оказывают некоторые вспомогательные параметры. В первую очередь это относится к средствам защиты металла шва от окисления. Принципиально возможны три вида защиты шва от окисления: газовая, флюсовая и газофлюсовая. Наибольшее распространение и практическое применение получила газовая защита.

Специфика лазерной сварки обуславливает использование специальных сопел и составов защитных газов, обеспечивающих не только надежную защиту, но и эффективное проплавление.

При лазерной сварке с глубоким проплавлением, определяют следующие требования к соплам и системе подачи газа:

с помощью элементов конструкции сопла необходимо обеспечить сдув потока паров и брызг, образующихся при сварке, перпендикулярно оси действия луча или существенно уменьшить размеры этого потока;

конструкция сопла должна быть такой, чтобы можно было оттеснить воздух от зоны сварки струей защитного газа;

защитный газ должен предотвращать окисление металла и образование внутренних дефектов в виде пор, раковин, газовых включений и пр.;

газ, подаваемый в зону обработки, должен способствовать снижению экранирующего действия плазменного факела.

Помимо газовой защиты, также возможна защита шва флюсами, что дает возможность дополнительно решать еще ряд важных технологических задач, а именно:

защищать поверхность шва от воздействия атмосферного воздуха;

предотвращать образование оксидных пленок на поверхности металла шва, препятствуя их попаданию в сварочную ванну;

уменьшать потери лазерного излучения при отражении и рассеивании;

снизить требования при подготовке свариваемых кромок деталей, увеличивая величину допуска на зазоры и перекос кромок свариваемых деталей;

обеспечивать оптимальное формирование проплавления и поверхности сварочного шва.

## ***Модуль 5 «Лазерная резка»***

*Механизмы газолазерной резки металлов.* Разработка и промышленное освоение методов резки современных конструкционных материалов, сочетающих высокие показатели как по производительности процесса, так и по точности и качеству поверхностей реза, являются актуальной необходимостью. К числу таких перспективных процессов разделения материалов следует отнести лазерную резку металлов.

Использование сфокусированного лазерного излучения, обеспечивающего высокую концентрацию энергии, позволяет разделять практически любые металлы и сплавы независимо от их теплофизических свойств. При этом можно получать узкие разрезы с минимальной зоной термического влияния.

Механизмы лазерной резки основаны на процессах нагрева, плавления, испарения, химических реакциях горения и удалении расплава из зоны реза.

Процесс, при котором под действием лазерного излучения происходят нагревание, плавление и испарение металла по линии предполагаемого реза, а продукты разрушения удаляются потоком вспомогательного газа, называется газолазерной резкой металлов.

Для резки металлов применяют технологические установки на основе твердотельных Nd:YAG- и газовых CO<sub>2</sub>-лазеров, работающих как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах излучения.

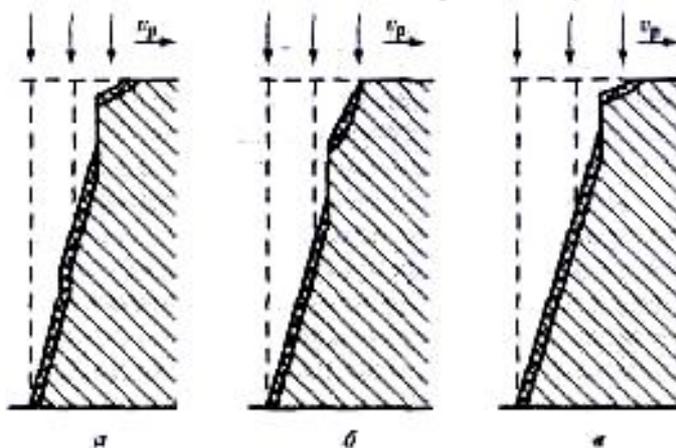
При воздействии лазерного излучения на металлы возможны два механизма резки – плавление и испарение.

При газолазерной резке металлов различают стационарный характер разрушения, когда жидкая ванна расплава расположена по всей длине канала реза, и нестационарный, отличающийся периодическим выбросом расплавленного металла из зоны обработки.

Стационарный характер разрушения достигается в том случае, когда скорости плавления металла в направлении реза и удаления расплавленного металла в каждом сечении канала равны. При меньших скоростях газолазерной резки металлов имеет место нестационарный, т. е. неустановившийся, характер разрушения.

Рассмотрим качественно физические основы нестационарного разрушения.

После удаления очередной массы жидкой ванны из канала реза в нижней его части вновь образуется расплав, так как из-за расширения сфокусированного лазерного излучения нижняя часть канала постоянно находится в поле лазерного излучения.



Стадии разрушения в процессе резки металлов непрерывным излучением при низких скоростях (нестационарный механизм)

При последующем перемещении материала относительно лазерного излучения оно попадает на зоны, расположенные выше канала, в результате чего они подплавляются. При этом удаление образованной ванны расплава не происходит, поскольку динамическое воздействие дополнительного потока газа оказывается недостаточным. Затем в результате плавления металла объем ванны увеличивается и по достижении его определенной величины расплав из зоны обработки удаляется. Процессы разрушения металла далее повторяются, вследствие чего на боковой поверхности кромок реза образуются бороздки.

При газолазерной резке сталей и других сплавов в качестве вспомогательного газа используют кислород, который выполняет три основные функции. Во-первых, он способствует предварительному окислению металла и уменьшению его отражательной способности. Во-вторых, кислород обеспечивает воспламенение и горение материала; при этом теплота, выделяющаяся при экзотермической реакции, усиливает термическое

воздействие лазерного излучения. В-третьих, под напором струи кислорода расплав и продукты сгорания металла удаляются из зоны ГЛР, обеспечивая одновременно приток кислорода непосредственно к фронту реакции горения.

*Физические процессы при лазерной резке металлов.* Лазерным разделением называется процесс достаточно быстрого локального нагрева, плавления и испарения материалов остросфокусированным лазерным излучением. С помощью лазерного излучения оказывается возможным довольно просто осуществлять операции разделения материалов — как сквозную резку или сверление отверстий, так и нанесение рисок, дорожек и пазов.

В случае применения лазерного излучения может быть достигнута высокая степень автоматизации технологического процесса обработки с помощью координатных устройств относительного перемещения луча и детали, управляемых ЭВМ.

Таким образом, преимущества лазерных методов разделения заключаются в следующем:

- 1) возможность разделения лазером обширного класса материалов независимо от их твердости;
- 2) возможность получения узких разрезов с минимальной зоной термического влияния в результате острой фокусировки, обеспечивающей локальность нагрева;
- 3) практически полное отсутствие механического воздействия на обрабатываемый материал (возможна обработка легкодеформируемых и нежестких материалов), в связи с чем отпадает необходимость в закреплении образца (можно ограничиться лишь фиксацией);
- 4) обеспечение высокой производительности процесса вследствие достижения высокой плотности мощности при фокусировке луча на поверхность обработки;
- 5) возможность контроля и строгой регламентации пребывания материала при высоких температурах в случае применения лазеров импульсно-периодического действия;
- 6) возможность автоматизации процесса на высоком уровне; использование соответствующих координатных устройств позволяет проводить лазерную резку по сложному контуру в двух и даже трех измерениях, начав процесс с произвольно выбранного места;
- 7) осуществление многопозиционной обработки.

В то же время применение лазерного излучения для разделения материалов нельзя считать универсальным средством, с помощью которого можно решить все проблемы, связанные с проведением того или иного процесса.

К основным недостаткам лазерных методов обработки относят высокую стоимость оборудования и низкий КПД лазерных установок. Однако постоянное совершенствование конструкций, новейшие достижения в области материаловедения, кристаллографии и газового разряда, а также применение новых оптических материалов позволяют отнести эти недостатки к разряду временных.

Лазерную резку можно выполнять как со сквозным прорезанием материала, так и в виде получения на его поверхности пазов и дорожек. К лазерной резке можно отнести следующие методы:

- 1) разделительная сквозная резка материалов для получения деталей готовых конфигураций;
- 2) термораскалывание хрупких материалов путем создания в зоне облучения термонапряжений, превышающих предел прочности материала;
- 3) скрайбирование — метод, применяемый для разделения полупроводниковых, керамических и ситалловых подложек на отдельные элементы; он занимает промежуточное положение между резкой и термораскалыванием.

Классифицировать операции разделения также можно по режимам воздействия излучения на материал. К операциям, проводимым с помощью лазеров непрерывного действия, относятся термораскалывание и сквозная резка материала. При выполнении остальных операций, как правило, используют импульсные или импульсно-периодические лазеры.

Процессы разделения материалов лазерным излучением основаны в большинстве случаев на передаче энергии квантов света тепловым колебаниям решетки твердого тела, т. е. на термическом воздействии света. В общем случае эти процессы включают в себя следующие стадии:

поглощение излучения и последующая передача энергии внутрь тела;

нагревание материала без разрушения;

изменение агрегатного состояния вещества (плавление, испарение, сублимация, термодеструкция);

удаление материала из зоны взаимодействия;

остывание материала после прекращения облучения.

Каждая из этих стадий так или иначе наблюдается при разрушающем воздействии излучения на любой материал. Первые четыре стадии во многом определяют производительность технологических операций, а вторая и пятая стадии - структурные и физико-химические превращения в облучаемом материале; четвертая стадия влияет на качественные показатели процесса.

Следует отметить, что характерное время протекания каждой из этих стадий зависит от физико-химических характеристик облучаемого материала, длины волны, энергетических параметров излучения, а также от условий взаимодействия. Таким образом, изучение процессов, происходящих на каждой из этих стадий, имеет важное значение для понимания существующих и разработки новых методов разделения материалов.

*Поглощение излучения и последующая передача энергии внутрь тела.* Как известно, электромагнитная волна, падающая на поверхность раздела, испытывает поглощение, рассеяние, отражение и преломление. На основании закона сохранения энергии можно записать:

$$E_o = E_R + E_M + E_A + E_T,$$

где  $E_o$  — поток излучения, падающий на поверхность раздела двух сред;  $E_R$  — поток отраженного излучения;  $E_M$  — поток рассеянного излучения;  $E_A$  — поток излучения, поглощенного средой;  $E_T$  — поток излучения, преломленного средой.

Разделив обе части данного уравнения на  $E_o$ , получим закон сохранения энергии, выраженный через спектральные коэффициенты  $R$ ,  $M$ ,  $A$  и  $T$ , характеризующие свойство излучения соответственно отражаться, рассеиваться, поглощаться и преломляться:

$$R + M + A + T = 1$$

При использовании лазерного излучения для разделения материалов происходит его взаимодействие с непрозрачными средами. В этом случае рассеяние и преломление излучения можно не учитывать, а определяющими энергетическую эффективность процесса разделения следует считать поглощение и отражение.

Значения коэффициента отражения и показателя поглощения определяются соответствующими механизмами, которые для металлов и неметаллов существенно различны.

## ***Модуль 6 «Лазерное разделение материалов»***

*Физико-химические основы разделения материалов.* При разделении материалов лазерное излучение может оказывать термохимическое воздействие, что может быть связано с:

- 1) локальным нагревом, т. е. увеличением в облучаемой среде числа частиц, имеющих энергию выше энергии активации химической реакции;
- 2) поглощением фотона молекулой, которая либо диссоциирует, либо возбуждается до уровня, когда для ее реакции с другой молекулой требуется малая энергия активации (при этом общая температура среды может практически не повышаться);

- 3) возбуждением радиационно-химических превращений, аналогичных процессам, происходящим при прохождении через среду быстрых частиц, которые образуют ионы, радикалы и возбужденные частицы;
- 4) макроскопическим разогревом среды.

*Энергетический баланс процесса лазерного разделения неметаллов.* Энергетический баланс процесса лазерного разделения в общем виде можно записать следующим образом:

$$P_0 + P_{x.p.} = P_{opt} + P_{\phi} + P_{отр} + P_{тп} + P_{газ} + P_{кин} + P_{раз},$$

где  $P_0$  — энергия излучения, выходящего из лазера;  $P_{x.p.}$  — энергия, связанная с протеканием химических реакций;  $P_{opt}$  — потери энергии на оптике;  $P_{\phi}$  — потери энергии на факеле;  $P_{отр}$  — потери энергии на отражение;  $P_{тп}$  — потери энергии вследствие теплопроводности;  $P_{газ}$  — потери энергии в результате отвода ее газовой струей;  $P_{кин}$  — потери энергии на разлетающихся продуктах разрушения;  $P_{раз}$  — потери энергии, расходуемой на разрушение материала.

С учетом особенностей разделения неметаллических и металлических материалов данное уравнение может изменяться в зависимости от эффективности тех или иных процессов.

Таким образом, энергетический баланс при проведении различных технологических процессов резки может изменяться, что следует учитывать при разработке технологий лазерного разделения материалов.

*Термическое действие лазерного излучения.* Испарение характеризуется следующими процессами.

1. Поглощение излучения поверхностью и передача энергии твердому телу. Увеличение температуры поверхности до точки кипения происходит настолько быстро, что жидкая фаза не успевает образоваться в значительном количестве.
2. Возгонка материала. Разрушение неметаллических материалов, в большинстве своем имеющих сложное химическое строение, происходит в виде последовательного по мере возрастания температуры испарения отдельных его составляющих их элементов. Для частично прозрачных при определенной длине волны материалов характерен режим внутреннего кипения.
3. Образование эрозионного факела. Удаление пара с поверхности материала происходит с околосвуковыми скоростями в виде струи, направленной от поверхности испарения, в которой вместе с паром движутся сконденсированные капли вещества и другие продукты эрозии, выброшенные со дна и стенок канала (лунки).
4. Возникновение волн давления. В результате возникновения импульса отдачи в связи с разлетом продуктов эрозии и значительного температурного градиента возникают волны давления и термомеханические напряжения, которые могут привести к механическому разрушению материала.
5. Экранировка поверхности. В процессе выхода пара из зоны обработки порог плазмообразования может снизиться, что может привести к ослаблению излучения, падающего на поверхность. Рассеяние и поглощение излучения также происходят на продуктах конденсации и твердых частицах вещества. Резонансное поглощение наблюдается при совпадении частоты характеристических колебаний молекул в газах или радикалах и частоты генерации лазерного излучения. Экранировка обуславливает оптимальное значение плотности мощности излучения, при котором удельный выброс массы максимален.
6. Установление автоколебательного режима испарения. Возникновение эрозионного факела и рост глубины канала (лунки) имеют самосогласованный пульсирующий характер.

Рассматриваемый механизм испарения характеризуется наибольшими удельными энергозатратами и, как правило, осуществляется с помощью лазеров импульсного действия при проведении операций сверления отверстий, скрайбирования и гравирования.

Процесс резки механизмом *плавления* материала характеризуется следующим.

1. В результате поглощения лазерного луча поверхностью материала происходят испарение и формирование парогазового канала.
2. Под действием совокупности сил аналогично процессу лазерной сварки с глубоким проплавлением жидкий расплав удерживается на стенках канала.
3. Удаление жидкого расплава из канала осуществляется фонтанированием, выплеском или выдуванием потоком вспомогательного газа.

Режим плавления обычно используют для металлов, горных пород, стекла, керамики и др. Существуют материалы {пластики, минералы), которые при лазерном излучении претерпевают необратимые изменения химического состава с выделением газообразных продуктов реакции и образованием вещества с иными физико-химическими свойствами. Кроме того, лазерный нагрев вещества в определенных газовых средах может приводить к развитию экзотермической реакции, являющейся дополнительным тепловым источником.

При проведении лазерного разделения в режиме плавления и выдувания требуется удельный энергозатрат на порядок меньше по сравнению с режима испарения.

Разделение с механизмом *термораскалывания* используют при облучении хрупких материалов (стекло, керамика и др.). Это связано с возникновением в объеме образца термоупругих напряжений, обусловленных наличием градиентом температур. Если напряжения превышают предел прочности, имеет место раз разрушение материала, которое носит характер растрескивания. Варьируя режимы лазерной обработки, можно добиться управляемого распространения трещин вслед за лучом. По сравнению с представленными выше процессами разделения при проведении управляемого термораскалывания требуются наименьший уровень мощности излучения и минимальные энергозатраты.

*Стадии лазерного разрушения неметаллических материалов.* Для разработки технологии лазерной резки неметаллических материалов необходимо рассмотреть влияние различных параметров на эффективность процесса.

Энергетические параметры процесса резки можно рассчитать с использованием формулы, определяющей значение максимальной температуры для быстро движущегося источника теплоты:

$$E_p = e \left( \frac{\pi}{8} \right)^{1/2} \frac{T_p \lambda_T}{1 - R} \left( \frac{v_p}{\alpha r_f} \right)^{1/2}$$

где  $E_p$  — энергия резки;  $T_p$  — максимальная температура;  $\lambda_T$  — коэффициент теплопроводности материала;  $R$  — коэффициент отражения;  $v_p$  — скорость резки;  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности;  $r_f$  — радиус фокусировки.

По этой формуле можно определить параметры резки тонких неметаллических пленок (лавсан, фторлон, полипропилен) и ряда других материалов (бумага, картон) в случае, если  $T_p$  принять равной температуре испарения или разложения этих материалов.

При разделении лазерным излучением листовых материалов толщиной  $H$  основные затраты теплоты связаны с расходом на разрушение материала. Если предположить, что вся энергия лазерного излучения затрачивается на нагрев удаляемого материала до температуры кипения и передачу ему скрытой теплоты испарения, то максимальную глубину слоя испаряемого материала можно определить по следующему выражению:

$$h = \frac{2P}{\pi r_f \rho v_p (cT_H + L_H)}$$

где  $P$  — мощность излучения;  $\rho$  — плотность вещества;  $c$  — теплоемкость;  $T_H$  — температура испарения материала;  $L_H$  — удельная энергия испарения.

Полученная линейная зависимость глубины прорезания от мощности излучения справедлива при небольших толщинах разрезаемого материала, равных нескольким радиусам сфокусированного пучка. С повышением величины  $P$  темп возрастания  $h$  замедляется соответственно зависимости  $h \sim P^{1/2}$ , что может быть объяснено как увеличением потерь

мощности в результате поглощения части излучения в аэрозоли, так и уменьшением плотности мощности в луче по глубине канала реза вследствие расширения пучка после прохождения фокальной плоскости.

*Технологические параметры и показатели процесса.* Энергетические условия резки можно определить с помощью удельной энергии резки  $S_p$ , которая является характеристикой материала и не зависит от условий резки. Удельную энергию резки, показывающую, какую энергию необходимо затратить на разрушение единицы массы вещества, определяют по формуле

$$S_p = cT_p$$

где  $c$  — теплоемкость;  $T_p$  — температура разрезаемого материала.

Другим важным технологическим параметром, характеризующим удельные энергетические затраты при лазерной резке материалов, является безразмерный термохимический параметр  $\Psi$ :

$$\Psi = -\frac{L_p}{\rho S_p} = -\frac{L_p}{\rho c T_p}$$

где  $L_p$  — удельная энергия химической реакции.

Для большинства материалов этот параметр находится в диапазоне  $-5 > \Psi > -10$ .

На профиль реза, его глубину и ширину существенное влияние оказывают параметры фокусировки лазерного излучения — размер пятна фокусировки, фокусное расстояние оптической фокусирующей системы, смещение фокальной плоскости относительно поверхности обрабатываемого материала, степень поляризации излучения и распределение плотности мощности по сечению пучка.

Следует отметить, что длина волны и лучения влияет на диаметр сфокусированного луча, коэффициенты поглощения и отражения материала. При одинаковом распределении плотности мощности, апертуре луча и фокусном расстоянии линзы диаметр луча тем меньше, чем меньше длина волны излучения.

Фокусное расстояние линзы  $f$ , определяющее наряду с апертурным размером угол схождения лучей  $\phi$  после фокусирующей системы, оказывает существенное влияние на глубину прорезания неметаллов.

Положение фокальной плоскости относительно поверхности разрезаемого материала также влияет на геометрические характеристики реза. Минимальная ширина реза обычно обеспечивается при фокусировке на поверхность материала. Смещение фокуса в ту или иную сторону от положения с минимальной шириной приводит к увеличению этого параметра, поскольку диаметр пятна излучения на материал при этом возрастает. Глубина реза достигает максимального значения при расположении фокальной плоскости на поверхности материала или на некотором расстоянии (1...1,5 мм) под ней.

Подача струи газа при разделении материалов вызвана необходимостью удаления из зоны резки расплавленного вещества (в режиме плавления) или продуктов эрозии и частиц конденсата (в режиме испарения).

Влияние газодинамических параметров при резке неметаллических материалов не является таким определяющим фактором, как при резке металлов, поскольку резка неметаллов осуществляется, как правило, в режиме, близком к испарению, когда канал реза образуется без использования газовой среды, тем не менее применение потоков вспомогательного газа, направляемого в зону обработки, позволяет значительно повысить качество кромок, уменьшить зону термического влияния и повысить эффективность процесса.

*Лазерное термораскалывание хрупких материалов.* Процесс управляемого термораскалывания (УТР) основан на температурном расширении стекла. При локальном нагреве данный процесс носит местный характер с созданием термонапряжений, которые при определенных условиях могут превысить предел прочности стекла, что может привести

к образованию трещины. Управляя развитием этой трещины, можно осуществлять разделение стекла по заданному контуру.

При использовании метода лазерного термораскалывания функцию источника локального нагрева выполняет лазерный луч, в результате попадания которого на стеклянный образец образуется трещина. Затем, перемещаясь вдоль поверхности образца, луч создает в нем такое распределение напряжений, при котором трещина распространяется по траектории, пройденной лучом, отставая от него на некоторое расстояние. В результате этого стекло разделяется по описываемому лазерным лучом контуру.

Согласно данным различных исследователей, методом УТР можно осуществлять разделение большинства хрупких материалов: алюмооксидной керамики, ферритов, монокристаллического кварца, сапфира, силикатных стекол. Исключение составляет плавленый кварц, обладающий малым коэффициентом температурного расширения, что не позволяет создать в нем достаточных термонапряжений.

По сравнению с традиционными механическими способами разделения стекла лазерное термораскалывание имеет ряд преимуществ.

К недостаткам метода УТР, существенно препятствующим его широкому внедрению в производство, следует отнести невысокие скорости обработки и, как следствие этого, низкую производительность. Однако при рассмотрении в целом всего технологического процесса получения деталей из листового стекла результаты, полученные при проведении оценки его экономичности и эффективности, могут дать основание о целесообразности использования метода лазерного термораскалывания.

Для определения мощности лазерного излучения, обеспечивающей разделение стекла со скоростью  $v$ , можно использовать следующую зависимость:

$$p = 2.85T_{CT} \sqrt{\delta^3 \lambda_T \rho c v}$$

где  $T_{CT}$  — температура стеклования, К;  $\delta$  — глубина трещины;  $\lambda_T$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м К);  $\rho$  — плотность стекла, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  — удельная теплоемкость, Дж/(кг К).

Данную формулу можно применять для расчета режимов термораскалывания не только стекла, но и других хрупких материалов (например, ситаллов, керамики).

Технология управляемого термораскалывания плоского стекла получила широкое применение при производстве индикаторов на жидких кристаллах, солнечных батарей, фотомасок, магнитооптических дисков и часовых стекол.

Применение управляемого термораскалывания для вырезки автомобильных стекол позволяет получать стекла практически любой формы, при этом операция шлифования исключается. Отсутствие микротрещин и сколов по краям обеспечивает повышенную прочность и надежность изготавливаемых деталей из стекла.

При производстве рекламной продукции, в строительстве, мебельной промышленности (обработка окон, витражей, ламп, зеркал, стеклянных ширм и т. п.) использование лазерного термораскалывания дает возможность создавать высокохудожественные, оригинальные изделия.

В медицине лазерное термораскалывание применяют в производстве хирургических стеклянных лезвий.

## ***Модуль 7 «Лазерная обработка пленочных материалов»***

*Физические основы лазерной обработки пленочных элементов.* Лазерные технологии в микроэлектронике используют довольно давно и успешно. Именно в этой отрасли еще в 1960-х годах прошлого столетия лазеры нашли первое применение. Невозможно представить все многообразие лазерных технологий, используемых в микроэлектронике. В связи с этим рассмотрим наиболее широко применяемые процессы, к которым относятся обработка

полупроводников, лазерная обработка пленок, изменение химического состава поверхности, подгонка элементов микросхем.

Расширение областей применения лазеров в настоящее время обусловило создание принципиально новых технологических процессов, проведение которых без использования лазера было бы невозможно. Эти процессы только начинают развиваться и в недалеком будущем будут внедрены в технологии изготовления различной продукции. К таким процессам относятся быстрое прототипирование, создание изображений в прозрачных материалах, комбинированные процессы обработки и др.

*Нагревание пленок под действием ЛИ.* Технологические процессы обработки пленок подразделяют на три группы:

подгонки (подстройки) электрических параметров пленочных электронных элементов; размерной обработки и формирования топологии пленочных элементов; записи информации.

Суть указанных процессов в большинстве случаев сводится к удалению части пленочного покрытия. Таким образом, процессы отличаются не физическими основами технологии, а требованиями к результатам обработки и методами их контроля.

При создании пленочных покрытий принципиально различают два вида пленок: тонкие (от 100 ангстрем до нескольких микрометров) и толстые пленки (от нескольких микрометров до 100 мкм).

Особую группу составляют процессы записи информации, причем наиболее отчетливо их специфика проявляется при цифровой записи, которая представляется на сегодняшний день наиболее перспективной. Ее основными параметрами являются плотность и скорость записи, которые обеспечиваются при существенно иных условиях, чем оптимальные параметры подгонки или размерной обработки.

*Формирование топологических пленочных элементов.* Технологический процесс размерной обработки тонких пленок, т. е. формирования топологических пленочных элементов, является более сложным для лазерной обработки, чем процесс подгонки. При его проведении предъявляют жесткие требования к точности, стабильности и производительности. Такая обработка является конкурирующим хорошо разработанным высокопроизводительным и весьма точным процессом.

Вместе с тем имеются следующие преимущества лазерной размерной обработки пленок (лазерной литографии):

возможность контроля процесса формирования топологии в реальном масштабе времени (из-за отсутствия стадии образования скрытого изображения);

высокая производительность лазерной обработки при изготовлении оригинальных единичных элементов и схем;

одноступенчатость процесса, резкое снижение стоимости оборудования;

большая чистота процесса (из-за отсутствия химических операций травления);

возможность исправления ошибок в процессе формирования топологии в результате возникновения обратной связи по размерам, например путем использования согласованной оптической фильтрации.

Получившей наиболее широкое применение эффективной операцией лазерной литографии является корректировка фотшаблонов. При изготовлении фотшаблонов гибридных интегральных схем в них образуются дефекты, число которых по мере увеличения степени интеграции и уменьшения размеров элементов быстро возрастает.

Для устранения дефектов темного поля можно использовать метод локального лазерного переноса вещества. В качестве материала донора может быть выбран любой материал, имеющий хорошую адгезию к пленке и подложке и обладающий необходимыми оптическими свойствами.

Лазерные методы удаления и переноса можно применять не только для ретуши фотошаблонов, но и для оперативной корректировки их топологии, а также внесения и удаления отдельных элементов.

*Лазерная запись информации.* Одним из направлений обработки лазерным излучением тонких пленок является запись информации, которую подразделяют на цифровую и аналоговую.

Цифровую запись информации выполняют при воздействии лазерного излучения на пленку, покрытую тонким напыленным слоем, в котором формируются отверстия или прорезы различной ширины и длины в зависимости от режимов облучения. Изменение размеров прорезы используют для кодировки информации. При считывании информации лазерный пучок меньшей мощности перемещается по дорожке, изменение отражения на пленке и прорезах является информацией для считывания. По такому принципу изготавливают компакт-диски для хранения информации в больших объемах.

*Термохимическое действие ЛЛ.* При разделении материалов лазерное излучение может оказывать термохимическое воздействие, что может быть связано с:

- 1) локальным нагревом, т. е. увеличением в облучаемой среде числа частиц, имеющих энергию выше энергии активации химической реакции;
- 2) поглощением фотона молекулой, которая либо диссоциирует, либо возбуждается до уровня, когда для ее реакции с другой молекулой требуется малая энергия активации (при этом общая температура среды может практически не повышаться);
- 3) возбуждением радиационно-химических превращений, аналогичных процессам, происходящим при прохождении через среду быстрых частиц, которые образуют ионы, радикалы и возбужденные частицы;
- 4) макроскопическим разогревом среды.

*Лазерное напыление тонких пленок в вакууме.* Метод основан на использовании физических процессов, происходящих при воздействии излучения на субстрат, а также его нагреве и испарении с последующим удалением вещества из зоны облучения. После этого вещество, достигая поверхности подложки, конденсируется в виде тонкой пленки.

Для лазерного напыления тонких пленок металлов чаще всего используют Nd:YAG-лазеры с длительностью импульсов от наносекунд до микросекунд, иногда применяют лазеры на рубине. При напылении неметаллических пленок применяют CO<sub>2</sub>-лазеры (в основном импульсно-периодические), также могут быть использованы эксимерные лазеры.

Наиболее часто напыление пленок осуществляют в режимах развитого испарения мишени при  $\tau = 10^{-8}$  с. Процесс напыления пленок разделяют на несколько основных этапов. На первом этапе лазерное излучение воздействует на мишень и в начале действия лазерного импульса происходит ее разогрев и испарение небольшой дозы вещества. С увеличением температуры степень ионизации испарившегося газа повышается, при этом коэффициент проходящего через него излучения также возрастает. При некоторых режимах наступает пробой, пар полностью ионизируется и интенсивность поглощения в нем резко повышается. На втором этапе происходит инерционный разлет продуктов лазерной эрозии в вакууме. На третьем этапе имеет место взаимодействие плазмы с поверхностью подложки, а на четвертом — образование и увеличение толщины слоя конденсата.

Эффективность лазерного напыления определяется интенсивностью парообразования в зоне облучения.

На процессы, происходящие при взаимодействии лазерного излучения с материалом, влияют пространственно-временные и энергетические параметры излучения, а также характеристики материала. В зависимости от параметров лазерного излучения различают мягкие, средние и жесткие режимы облучения.

*Мягкие режимы* характеризуются плотностью мощности  $q = 10^5 \dots 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> и длительностью импульса  $\tau = 10^{-3} \dots 10^{-6}$  с. Такие режимы используют для осаждения

однокомпонентных металлических материалов: Сг, W, Al и других, а также для поочередного испарения компонентов с различной температурой испарения.

*Средние режимы* отличаются плотностью мощности  $q = 10^7 \dots 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> и длительностью импульса  $\tau = 10^{-8}$  с. Подводимая энергия примерно соответствует энергии диссоциации напыляемых соединений. При напылении происходит частичная диссоциация молекул, а при осаждении — ассоциация продуктов разложения в молекулы.

Такие режимы используют для напыления многокомпонентных полупроводниковых слоев (например, GaAs, GdS, InSb, CdTe, PbCdSe), а также сверхпроводящих слоев (BiSrCaCuO и др.).

*Жесткие режимы* (режимы модулированной добротности) характеризуются высокой плотностью мощности излучения ( $q = 10^8 \dots 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) и короткими импульсами ( $\tau = 10^{-8}$  с). При этом испарение субстрата происходит по механизму термического взрыва.

*Подгонка электрических параметров пленочных элементов.* Для обеспечения нормального функционирования любой электрической схемы после сборки требуется ее настройка. Необходимость выполнения этой операции вызвана конечными значениями экономических допусков на элементы схемы.

Технически эту проблему можно решить двумя методами: введением в схему регулируемого элемента (подстроечного резистора, конденсатора и т. д.); применением подгоночной технологической операции.

В настоящее время используют следующие методы подгонки: механические (в том числе абразивные); химические (травление, анодирование); термические (в том числе токовые).

Одним из лучших методов подгонки параметров пленочных элементов является лазерный.

Достоинства метода состоят в следующем: хорошая управляемость и безынерционность процесса; возможность обратной связи по подстраиваемому параметру, что обеспечивает требуемую точность подстройки; высокая локальность, что позволяет применять данный метод для подгонки схем с высокой плотностью и малыми размерами элементов; минимальное воздействие на подложку; бесконтактность, что дает возможность подстраивать элементы в работающей схеме; достаточно высокая производительность.

## ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

В рамках дисциплины выполняются лабораторные работы по соответствующим разделам.

В пункте 4.2 рабочей программы дисциплины приведен список лабораторных работ. Из представленного списка работ преподаватель составляет график выполнения работ для каждой бригады, состоящей как правило из двух человек, так чтобы было минимальное совпадение работ. Теоретическое содержание и методические указания по выполнению лабораторных работ представлены в учебно-методическом пособии [1] дополнительного списка литературы.

### 3 Методические указания (рекомендации)

#### 3.1 Методические указания для преподавателей

Дисциплина «Технология лазерной обработки» относится к циклу специальных дисциплин, региональная компонента. Для изучения дисциплины предусмотрена аудиторная и самостоятельная формы работы.

В пунктах 3 и 5 рабочей программы приведены формы текущего, итогового контроля и форма самостоятельной работы. К аудиторным видам работы относятся лекции и лабораторные занятия.

На лекциях излагается основной материал по темам дисциплины. Подготовка лекции непосредственно начинается с разработки структуры рабочего лекционного курса по конкретной дисциплине. Количество лекций определяется с учетом общего количества часов, отведенных для лекционной работы.

Структура лекционного курса обычно включает в себя вступительную, основную и заключительную части. После определения структуры лекционного курса по темам можно приступить к подготовке той или иной конкретной лекции.

Методика работы над лекцией предполагает примерно следующие этапы:

- выяснение того, что и в каком объеме было изучено студентами ранее по родственным дисциплинам;
- определение места изучаемой дисциплины в учебном процессе подготовки специалиста;
- отбор материала для лекции;
- определение объема и содержания лекции;
- выбор последовательности и логики изложения, составление плана лекции;
- подбор иллюстративного материала;
- выработка манеры чтения лекции.

Отбор материала для лекции определяется ее темой. Следует тщательно ознакомиться с содержанием темы в базовой учебной литературе, которой пользуются студенты. Выяснить, какие аспекты изучаемой проблемы хорошо изложены, какие данные устарели и требуют корректировки. Следует определить вопросы, выносимые на лекцию, обдумать обобщения, которые необходимо сделать, выделить спорные взгляды и четко сформировать свою точку зрения на них.

Определение объема и содержания лекции – ещё один важный этап подготовки лекции, определяющий темп изложения материала. Это обусловлено ограниченностью временных рамок, определяющих учебные часы на каждую дисциплину. Не рекомендуется идти по пути планирования чтения на лекциях всего предусмотренного программой материала в ущерб полноте изложения основных вопросов. Лекция должна содержать столько информации, сколько может быть усвоено аудиторией в отведенное время. Лекцию нужно разгружать от части материала, переносить его на самостоятельное изучение. Самостоятельно изученный студентами материал, наряду с лекционным, выносится на экзамен. Если лекция будет прекрасно подготовлена, но перегружена фактическим (статистическим, и т.п.) материалом, то она будет малоэффективной и не достигнет поставленной цели.

Кроме того, при выборе объема лекции необходимо учитывать возможность «среднего» студента записать ту информацию, которую он должен обязательно усвоить. Приступая к решению вопроса об объеме и содержании лекции, следует учитывать ряд особенных, специфических черт этого вида занятия, в том числе и дидактическую характеристику лекции. Лекция входит органичной частью в систему учебных занятий и должна быть содержательно увязана с их комплексом, с характером учебной дисциплины, а также с образовательными возможностями других форм обучения.

Содержание лекции должно отвечать ряду дидактических принципов. Основными из них являются: целостность, научность, доступность, систематичность и наглядность.

После определения объёма и содержания лекции, необходимо с современных позиций проанализировать состояние проблемы, изложенной в учебных материалах, и составить расширенный план лекции.

Основные этапы планирования и подготовки занятий:

- Разработка системы занятий по теме или разделу.
- Определение задач и целей занятия.
- Определение оптимального объема учебного материала, расчленение на ряд законченных в смысловом отношении блоков, частей.
- Разработка структуры занятия, определение его типа и методов обучения.
- Нахождение связей данного материала с другими дисциплинами и использование этих связей при изучении нового материала.
- Подбор дидактических средств (фильмов, карточек, плакатов, схем, вспомогательной литературы).
- Определение форм и методов контроля знаний студентов.
- Определение самостоятельной работы по данной теме.

В учебном плане по каждой дисциплине имеется графа «Самостоятельная работа» с указанием количества часов, отведенных на эту работу. В рабочей программе дисциплины предусмотрен раздел «Самостоятельная работа», в котором должны быть изложены:

1. Количество часов, выделенных в учебном плане на самостоятельную работу.
2. Число заданий на самостоятельную работу, которое студент должен выполнить в процессе изучения дисциплины.
3. Краткое содержание каждого задания.
4. Сроки и формы промежуточного контроля по выполненным заданиям.

Все виды самостоятельной работы, предусмотренные в рабочей программе по каждой дисциплине, должны быть обеспечены методическими указаниями, являющимися неотъемлемой частью методического обеспечения читаемой дисциплины.

В ходе самостоятельной работы студент осваивает теоретический материал по дисциплине (освоение лекционного курса, а также освоение отдельных тем), закрепляет знание теоретического материала подготовка и выполнение работ по физическому практикуму и выполнение расчетно-графических работ.

К видам самостоятельной работы в пределах данной дисциплины относятся:

- 1) написание конспектов по темам,
- 2) подготовка к контролирующему тесту по модулю,
- 3) подготовка к лабораторным работам,
- 4) подготовка к зачёту по дисциплине.

Перед выдачей заданий на самостоятельную работу преподаватель читает вводную лекцию, в которой излагаются:

1. Тема задания, алгоритм его выполнения.
2. Перечень литературы, необходимой для выполнения задания.
3. Комплекс задач, которые студент обязан решить.
4. Порядок текущего контроля за выполнением самостоятельной работы.
5. Краткое содержание методических указаний по выполнению самостоятельной работы и место, где можно получить эти методические указания.
6. Форма представления выполненного варианта задания.
7. Методика контроля по выполненному заданию .

Критериями оценки результатов работы студентов в течение студента являются: уровень освоения студентом учебного материала, умения студента использовать теоретические знания при выполнении практических задач, обосновать четкость изложения ответов. По окончании курса студенты обязаны сдать зачет. Сроки проведения итогового контроля устанавливается графиком учебного процесса. При проведении итогового контроля по дисциплине преподаватель должен оценить уровень сформированности у студентов умений

и навыков при освоении программы дисциплины.

### 3.2 Методические указания для студентов

В процессе изучения лекционного материала рекомендуется использовать не только опорные конспекты, но и учебники и учебные пособия. Перед каждой лекцией рекомендуется просмотреть материал по предыдущей лекции.

#### Методические рекомендации по подготовке к лабораторным работам.

1. Лабораторные работы выполняются по индивидуальному графику бригадой, состоящей из 2-3 студентов.

2. Подготовка к лабораторным работам требует достаточное количество времени, поэтому целесообразно планировать ее заранее!

3. Каждому занятию предшествует предварительная подготовка студента, которая включает в себя: а) ознакомление с содержанием лабораторной работы по методическим указаниям к ней; б) проработку теоретической части по учебникам, рекомендованным в методических указаниях; в) подготовка отчета по лабораторной работе.

Отчет должен содержать:

- 1) название лабораторной работы;
- 2) цель;
- 3) приборы и принадлежности;
- 4) таблицу для занесения метрологических характеристик измерительных приборов;
- 5) теоретическую часть (основные понятия и законы);
- 6) описание метода измерений и установки;
- 7) таблицы для записи в них результатов измерений.

Теоретическая часть должна быть краткой, занимать не более листа. Она должна содержать основные положения, законы, лежащие в основе изучаемого физического явления, и рабочую формулу (без вывода) с расшифровкой всех буквенных обозначений. Студент должен помнить, что методические указания к лабораторным работам являются только основой для их выполнения. Теоретическую подготовку к каждой лабораторной работе необходимо осуществлять с помощью учебной литературы.

4. Оформление результатов работы производится в **личном лабораторном журнале** студента. Утерянный лабораторный журнал подлежит восстановлению.

5. Перед выполнением эксперимента студент должен получить допуск к работе. Для получения допуска студент должен пройти собеседование с преподавателем и ответить на следующие вопросы:

- какова цель экспериментальной задачи? Каковы основы теории изучаемого явления, основные понятия и формулы?
- каков принцип работы экспериментальной установки?
- каковы основные этапы эксперимента.

5. Получив допуск, выполните эксперимент с соблюдением его методики и правил техники безопасности. Занесите данные измерений в таблицы вашего отчета.

После выполнения эксперимента студент должен получить отметку преподавателя о выполнении работы. Без **подписи** преподавателя работа не считается выполненной. Не рекомендуется разбирать установку или изменять ее параметры до проверки результатов преподавателем. Одно измерение следует провести в присутствии преподавателя.

6. Произведите вычисление искомого параметра (или зависимости). Произведите обработку измерений. Отчет должен быть оформлен аккуратно: чертежи и таблицы следует выполнять **по линейке**, цифры должны легко и правильно читаться. В случае графического представления результатов используйте только масштабную-координатную бумагу.

6. Запишите результат экспериментального задания, укажите абсолютную и

относительную погрешность измерений, сделайте выводы.

7. Для получения зачета по работе необходимо представить преподавателю оформленный отчет со всеми необходимыми расчетами и защищает его в ходе последующего собеседования. Для получения зачета студент представляет преподавателю оформленный отчет **со всеми расчетами**.

8. Если студент не выполнил лабораторную работу, то на следующем занятии он выполняет следующую по графику работу. Пропущенную работу можно выполнить в течение семестра на другом занятии, предварительно получив допуск у преподавателя.

9. Следует своевременно сдавать выполненные работы: не допускается выполнение следующей работы при наличии двух выполненных, но не зачтенных работ.

### **3.3 Методические рекомендации по самостоятельной работе студентов**

Самостоятельная работа студентов – это процесс активного, целенаправленного приобретения студентом новых для него знаний и умений без непосредственного участия преподавателей. Самостоятельная работа сопровождается эффективным контролем и оценкой ее результатов.

Предметно и содержательно самостоятельная работа определяется государственным образовательным стандартом, действующим учебным планом, рабочей программой дисциплины, средствами обеспечения самостоятельной работы.

Самостоятельная работа – это важнейшая часть любого образования. Для студента она начинается с первых дней учебы в высшем учебном заведении. Это работа, которую за него никто не в состоянии выполнить и обязанность преподавателя – научить студента самостоятельно трудиться, самостоятельно пополнять запас знаний.

Для успешной самостоятельной работы студент должен планировать свое время и за основу рекомендуется брать рабочую программу учебной дисциплины.

#### Самостоятельная работа студента при подготовке и изучению лекционного материала.

После прослушивания лекции необходимо проработать и осмыслить полученный материал. Умение слушать, творчески воспринимать излагаемый материал – это необходимое условие для его понимания. Внимательное слушание требует умственного напряжения, волевых усилий. В процессе лекционного занятия необходимо выделять важные моменты, выводы, анализировать основные положения. Если при изложении материала преподавателем создана проблемная ситуация, пытаться предугадать дальнейший ход рассуждений. Это способствует лучшему усвоению материала лекции и облегчает запоминание отдельных выводов. Из сказанного следует, что для более прочного усвоения знаний лекцию необходимо конспектировать.

Конспект лекций должен быть в отдельной тетради. Не надо стремиться подробно слово в слово записывать всю лекцию. Конспектируйте только самое важное в рассматриваемом параграфе: формулировки определений и законов, выводы основных уравнений и формул, то, что старается выделить лектор, на чем акцентирует внимание студентов. Старайтесь отфильтровывать и сжимать подаваемый материал. Более подробно записывайте основную информацию и кратко – дополнительную. Не нужно просить лектора несколько раз повторять одну и ту же фразу для того, чтобы успеть записать. По возможности записи ведите своими словами, своими формулировками. Лекция не должна превращаться в своеобразный урок-диктант. Поскольку в этом случае вы не учитесь мыслить и анализировать услышанное и лекция превращается в механический процесс.

Тетрадь для конспекта лекций также требует особого внимания. Ее нужно сделать удобной, практичной и полезной, ведь именно она является основным информативным источником при подготовке к различным отчетным занятиям, зачетам, экзаменам. Целесообразно отделить поля, где можно бы изложить свои мысли, вопросы, появившиеся в ходе лекции. Полезно одну из страниц оставлять свободной. Она потребуется потом, при самостоятельной подготовке. Сюда можно будет занести дополнительную

информацию по данной теме, полученную из других источников: чертежи и рисунки, схемы и графики, цитаты и биографии выдающихся ученых и т.д. Таким образом, на лекции студент должен совместить два момента: внимательно слушать лектора, прикладывая максимум усилий для понимания излагаемого материала и одновременно вести его осмысленную запись.

Рабочей программой дисциплины предусматривается самостоятельное изучение определенных тем, приведенных в пункте 7.5, и их конспектирование. При составлении конспектов можно пользоваться теми же принципами, что при написании лектора. Не нужно полнотекстовое копирование, научитесь в процессе конспектирования разбивать текст на смысловые части и заменять их содержание короткими фразами и формулировками.

#### Самостоятельная работа при выполнении лабораторных работ.

Главные задачи лабораторных работ таковы:

- 1) экспериментальная проверка физических законов;
- 2) освоение методики измерений и приобретение навыков физического эксперимента;
- 3) изучение принципов работы физических приборов;
- 4) приобретения умения обработки результатов эксперимента.

Прежде чем приступить к выполнению эксперимента, необходимо внимательно ознакомиться с методическим описанием лабораторной работы. Методические описания содержат:

- 1) название работы, ее цель;
- 2) перечень приборов и принадлежностей;
- 3) общую часть (справочные сведения о сути изучаемого явления или эффекта);
- 4) методику проведения работы;
- 5) описание измерений;
- 6) обработку результатов измерений;
- 7) контрольные вопросы.

Основная часть времени, выделенная на выполнение лабораторной работы, затрачивается на самостоятельную подготовку: описание работы в индивидуальном лабораторном журнале, подготовка к допуску работы, самостоятельная обработка полученных результатов их анализ, формулировка выводов по проделанной работе, подготовка к защите теоретической части работы.

Студент должен понимать, что методическое описание – это только основа для выполнения работы, что навыки экспериментирования зависят не от качества описания, а от отношения студента к работе и что формально, бездумно проделанные измерения – это потраченное впустую время. Если студент приступает к работе без четкого представления о теории изучаемого вопроса, он не может «узнать в лицо» физическое явление, не сумеет отделить изучаемый эффект от случайных помех, а также окажется не в состоянии судить об исправности и неисправности установки. Поэтому этапу выполнения работы предшествует «допуск к работе». Этот этап необходим и по той причине, что в лабораторном практикуме часто изучаются темы еще не прочитанные на лекциях и даже не включенные в лекционный курс. Для облегчения подготовки к сдаче теоретического материала полезно ответить на контрольные вопросы, сформулированные в методическом описании.

Для успешного выполнения лабораторной работы студенту необходимо разобраться в устройстве установки или макета. Проверив приборы установки, подготовив их к работе, студент приступает к наблюдению тех эффектов или явлений, которым посвящена данная работа. Опыт экспериментальной работы нельзя приобрести без самостоятельного экспериментирования. Отсчет измеряемых величин полагается производить с максимальной точностью. Поэтому перед снятием результатов измерений необходимо проверять нулевые показания приборов и установить цены деления на шкалах. Этап обработки результатов измерений не менее важен, чем проведение эксперимента. Многие физические законы,

полученные в результате экспериментальных исследований, выражаются в виде математических формул, связывающих числовые значения физических характеристик. Поэтому обязательно следите за тем, чтобы, при выполнении тех или иных измерений, были разумно согласованы друг с другом точность определения различных величин.

Если в лабораторной работе исследуется зависимость одной величины от другой, эту зависимость следует представить графически. Число точек на различных участках кривой и масштабы выбираются с таким расчетом, чтобы наглядно были видны места изгибов, экстремумов и скачков. Кроме системы координат с равномерным масштабом применяют полулогарифмические и логарифмические шкалы. Вычисление искомой величины содержит и расчет погрешностей измерения.

Выполнение каждой из запланированных работ заканчивается предоставлением отчета.

#### Самостоятельная работа студента при подготовке к контролирующим тестам, зачету.

В высшей школе студент должен прежде всего сформировать потребность в знаниях и научиться учиться, приобрести навыки самостоятельной работы, необходимые для непрерывного самосовершенствования, развития профессиональных и интеллектуальных способностей.

К формам учета знаний по дисциплине «Технология лазерной обработки» кроме зачета рабочей программой предусмотрены также контролирующие тесты по модулям.

Согласно рабочей программе по дисциплине контролирующий тест проводится по темам соответствующих модулей. В каждом тестовом задании от 7 до 10 заданий. Цель тестирования - способствовать повышению эффективности обучения учащихся, выявить уровень усвоенных теоретических знаний, выявить практические умения и аналитические способности студентов. Тест позволяет определить, какой уровень усвоения знаний у того или иного учащегося, т.е. определить пробелы в обучении. А на основе этого идет коррекция процесса обучения и планируются последующие этапы учебного процесса. При подготовке к контролирующему тесту необходимо повторить теоретический материал по определенным темам.

Зачет – форма итоговой проверки и оценки полноты и прочности знаний студентов, а также сформированности умений и навыков; проводится в виде собеседования по важнейшим вопросам каждого раздела изученного курса или по курсу в целом в индивидуальном порядке. Может проводиться с применением тестирования.

Основная цель подготовки к зачету — достичь понимания физических законов и явлений, а не только механически заучить материал. Но все же довольно много вещей придется просто выучить. При этом следует учитывать ваши индивидуальные особенности. К примеру, если у вас зрительный тип памяти, тогда следует уделить особое внимание внешней форме вашего краткого конспекта — недопустим небрежный, неразборчивый, мелкий почерк. Формулы должны быть отделены от текста некоторым пространством, чтобы «бросаться в глаза» сразу. Конечно, аккуратный конспект потребует несколько большего времени, но в итоге время на заучивание сократится, и вы эффективнее подготовитесь к экзамену. Если у вас слуховой тип памяти, следует проговаривать наиболее важную часть материала, возможно даже использовать магнитофон для подготовки. Если же преобладающим у вас является моторный тип памяти, то конспект нужно переписать несколько раз, причем каждый раз надо вычеркивать то, что вы уже выучили достаточно хорошо, оставляя для переписывания только самое необходимое для запоминания.

#### 4. Контроль знаний.

Контроль знаний, умений и навыков студентов по изучению дисциплины осуществляется на уровне текущего и итогового контроля.

##### 4.1 Текущий контроль знаний

Текущий контроль успеваемости проводится с целью повышения качества и прочности знаний, проверки процесса и результатов усвоения учебного материала. Текущий контроль успеваемости проводится в течении семестра и предполагает вставление каждому студенту отметок, оценивающих выполнение им всех видов работ, предусмотренных учебной программой дисциплины.

Текущий контроль осуществляется при работе на лекциях, на лабораторных работах, при выполнении заданий для самостоятельной работы, тестировании. Образцы различных видов оценочных средств текущего контроля по дисциплине представлены ниже.

#### Примерный вариант контролирующего теста

**Контролирующий тест  
по модулю 1 «Поверхностная лазерная обработка»  
по дисциплине «Технология лазерной обработки».**

##### *Задание 1. (выберите один вариант ответа)*

Выберите от каких параметров зависит формируемая структура в результате лазерной обработки в сталях.

##### **Варианты ответов:**

1)	от степени завершенности процесса аустенитизации при нагреве	2)	энергией лазерного воздействия
3)	скоростью охлаждения стали	4)	обработкой стали до лазерного воздействия

##### *Задание 2. (выберите один вариант ответа)*

Укажите порядок зоны лазерного воздействия после лазерной закалки

##### **Варианты ответов:**

1)	зона оплавления, зона закалки из твердой фазы, переходная зона	2)	зона термического влияния, переходная зона
3)	зона оплавления, переходная зона, зона закалки из твердой фазы	4)	зона оплавления, зона закалки из твердой фазы

##### *Задание 3. (выберите два варианта ответа)*

Какие неоднородности могут образоваться в эвтектоидной стали при лазерном воздействии

##### **Варианты ответов:**

1)	неоднородности обусловленные не полным превращением цементита в аустенит	2)	неоднородности обусловленные неполным превращением феррита в аустенит
3)	неоднородности обусловленные быстрым растворением цементита	4)	неоднородности обусловленные неполным выравниванием концентрации углерода в аустените

**Задание 4.** (выберите один вариант ответа)

Между какими частями структуры доэвтектоидной стали после лазерного воздействия имеется наибольшая неоднородность по углероду

**Варианты ответов:**

1)	между бывшими ферритными и перлитными участками	2)	в перлите и аустените
3)	между цементитом и аустенитом	4)	между цементитом и ферритом

**Задание 5.** (выберите один вариант ответа)

Вследствие чего повышается твердость титана после лазерной термообработки

**Варианты ответов:**

1)	вследствие образования $\alpha$ '-фазы	2)	вследствие образования $\beta$ -фазы
3)	вследствие образования нитридов и оксидов титана	4)	вследствие образования карбидов и оксидов титана

**Задание 6.** (выберите два вариант ответа)

Для чего проводится лазерный рекристаллизационный отжиг

**Варианты ответов:**

1)	с целью получения более равновесной структуры по сравнению с исходным состоянием	2)	уменьшение дефектности структуры
3)	повышение твердости и увеличение пластичности локальных участков	4)	для увеличения сопротивления усталости

**Задание 7.** (выберите один вариант ответа)

Какие фазовые и структурные превращения происходят при лазерном отпуске закаленной стали

**Варианты ответов:**

1)	образование мартенсита отпуска, распад остаточного аустенита и формирование ферритно-цементитной сетки	2)	образование бейнита, распад остаточного аустенита и формирование цементитной сетки
3)	образование ферритно-цементитной сетки	4)	образование мартенсита

## 4.2 Итоговый контроль знаний

К итоговым формам контроля, проводимым по данной дисциплине, является зачет. Примерные зачетные представлены в пункте 7.3 рабочей программы дисциплины.

Зачет – форма итоговой проверки и оценки полноты и прочности знаний студентов, а также сформированности умений и навыков.

Рекомендации по подготовке к зачету представлены в пункте 3.3 настоящего учебно-методического комплекса по дисциплине.

## **5. Интерактивные технологии и инновационные методы, используемые в образовательном процессе.**

При преподавании дисциплины «Технология лазерной работе» используется технология модульного обучения. Дисциплина разделена на 7 модулей, исходя из того, что модуль, его оптимальный объем логически соответствует завершеному разделу учебной дисциплины. При этом в соответствии с целевым назначением модули являются смешанными, т.е. соединяют в себе познавательные и операционные функции. В модуле излагается принципиально важное содержание учебной информации, дается разъяснение к этой информации, определяются условия погружения в информацию (с помощью средств ТСО, конкретных литературных источников, методов добывания информации), приводятся теоретические задания и рекомендации к ним, указаны практические задания.

Каждый модуль заканчивается контрольной проверкой знаний (проведение контролирующего теста).

При чтении лекций по данной дисциплине используется такой неимитационный метод активного обучения, как «Проблемная лекция», а при определенных темах «Лекция-визуализация».

При выполнении работ используются следующий прием интерактивного обучения «Кейс-метод»: задание студентам для подготовки к выполнению лабораторной работы имитирующей реальное событие; обсуждение с преподавателем цели работы и хода выполнения ее выполнения; обсуждение и анализ полученных результатов; обсуждение теоретических положений, справедливость которых была установлена в процессе выполнения лабораторной работы.