

Федеральное агентство по образованию
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОУВПО «АмГУ»

УТВЕРЖДАЮ

Зав.кафедрой ФМиЛТ

_____ Е.С. Астапова

« _____ » _____ 2007г.

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ

для специальности 010701 «Физика»

Составители: И.В. Верхотурова, Ю.А. Петраченко

Благовещенск 2007 г.

Печатается по решению
редакционно-издательского совета
инженерно-физического факультета
Амурского государственного
университета

И.В. Верхотурова, Ю.А. Петраченко

Учебно-методический комплекс по дисциплине «Технология лазерной обработки» для студентов очной формы обучения специальностей 010701 «Физика».- Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2007. – 158 с.

Учебно-методические рекомендации ориентированы на оказание помощи студентам очной формы обучения по специальностям 010701 «Физика» для формирования у студентов знаний в области современных методов и средств лазерной технологии, умения поставить технологический процесс и грамотно эксплуатировать лазерные технологические установки.

© Амурский государственный университет, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

1. Рабочая программа дисциплины _____	4
2. Лекционный курс _____	10
3. Лабораторный практикум _____	110

Федеральное агентство по образованию РФ
Амурский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по УНР
Е.С. Астапова

_____ подпись, И.О.Ф

«__» _____ 200__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по *Технологии лазерной обработки*

для специальности *010701 - физика*

Курс 5 Семестр

Лекции 28 (час.) Экзамен

Практические (семинарские) занятия (час.) Зачет - 9 семестр

Лабораторные занятия – 28 (час)

Самостоятельная работа 28 (час.)

Всего часов -84

Составитель к.ф.-м.н., ст.преподаватель Гопиенко И.В.

Факультет *инженерно - физический*

Кафедра *физического материаловедения и лазерных технологий*

2006 г.

Рабочая программа составлена на основании авторских разработок

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры физического материаловедения и лазерных технологий

«__» _____ 200__ г., протокол № _____

Заведующий кафедрой _____ д.ф.-м.н. Астапова Е.С.

Рабочая программа одобрена на заседании УМС _____
(наименование специальности)

«__» _____ 200__ г., протокол № _____

Председатель _____
(подпись, И.О.Ф.)

Рабочая программа переутверждена на заседании кафедры от _____
протокол № _____ .

Зав.кафедрой _____
подпись _____ Ф.И.О. _____

СОГЛАСОВАНО
Начальник УМУ

(подпись, И.О.Ф.)

«__» _____ 200__ г.

СОГЛАСОВАНО
Председатель УМС факультета

(подпись, И.О.Ф.)

«__» _____ 200__ г.

СОГЛАСОВАНО
Заведующий выпускающей кафедрой

(подпись, И.О.Ф.)

«__» _____ 200__ г.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

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.

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

1. **Введение.** Содержание курса и его значение в подготовке физиков. Перспективы развития лазерной техники и технологии. Схемы и конструкции технологических лазеров. Лазерные технологические процессы в микроэлектронике и перспективные направления лазерной обработки материалов. Основные требования по обеспечению безопасности при работе с технологическими лазерами. (2 часа).

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. (2 часа).

3. **Физические процессы при взаимодействии ЛИ с материалами.** Энергетические условия взаимодействия ЛИ при обработке материалов. Плазменные процессы при лазерной обработке. Тепловые процессы при лазерном воздействии. (2 часа).

4. **Термодеформационные процессы и превращения в металлах при воздействии лазерного излучения.** Деформации и напряжения при лазерной обработке. Теоретические и экспериментальные методы определения деформаций и напряжений. Особенности распределения остаточных деформаций и напряжений. Технологическая прочность металлов при лазерной обработке. (2 часа).

5. **Поверхностная лазерная закалка сплавов.** Классификация методов поверхностной лазерной обработки. Особенности образования структур в сталях при лазерном нагреве. Особенности структуры, образовавшейся при большой скорости охлаждения. Структура и строение поверхностных слоев сталей и чугунов после лазерной обработки. Структура и механизмы упрочнения цветных металлов и сплавов. Основные параметры импульсной закалки и характеристики упрочненной поверхности. Основные параметры лазерной закалки непрерывными лазерами и характеристики упрочненной поверхности. Факторы, влияющие на геометрические размеры зон лазерного воздействия. Лазерный отжиг. Лазерный отпуск. (10 часа).

6. **Получение поверхностных покрытий при помощи лазерного излучения.** Лазерное поверхностное легирование. Лазерная наплавка (2 часа).

7. **Лазерная сварка металлов.** Классификация способов лазерной сварки. Технологические особенности лазерной сварки. Физические процессы образования сварного соединения при сварке материалов малых толщин и с глубоким проплавлением. Технология лазерной сварки

материалов малых толщин и с глубоким проплавлением. (2 часа.)

8.Лазерное разделение конструкционных материалов. Особенности разделения материалов. Технология лазерной резки неметаллических материалов. Лазерная обработка хрупких материалов. Технология газолазерной резки металлических материалов. (2 часа).

9.Лазерные технологии в микроэлектронике. Лазерный отжиг, рекристаллизация и легирование полупроводников. Лазерное нанесение тонких пленок и изменение химического состава поверхностных слоев деталей электронных приборов. Лазерная обработка пленочных материалов (2 часа).

10.Перспективные направления технологий лазерной обработки. Методы быстрого прототипирования с использованием лазерного излучения. Лазерная динамическая балансировка деталей. Лазерная технология создания объемных изображений в стекле. Лазерная пайка металла с керамикой. (2 часа.)

СПИСОК ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

№	раxОбъем в	Наименование	Характер и цель занятий
1	2	3	4
1	4	Техника безопасности при эксплуатации лазерных установок	Ознакомление с основными положениями безопасной эксплуатации лазерных установок
2	4	Изучение устройства, принципа работы технико-эксплуатационных параметров и характеристик твердотельного импульсного лазера с активным элементом из иттрий-алюминиевого граната, легированного неодимом (типа ЛТУ «Квант-15»).	Приобретение навыков работы на ЛТУ «Квант-15». Освоение мер безопасности при работе с технологическими лазерами.
3	4	Изучение устройства, принципа работы технико-эксплуатационных параметров и характеристик твердотельного импульсного лазера с активным элементом из иттрий-алюминиевого граната, легированного неодимом (типа ЛТН-103).	Приобретение навыков работы на ЛТН-103. Освоение мер безопасности при работе с технологическими лазерами.
4	4	Изучение устройства, принципа работы технико-эксплуатационных параметров и характеристик непрерывного лазера (типа «Шатл»).	Приобретение навыков работы на ЛУ «Шатл».
5	4	Фокусировка лазерного излучения одиночными линзами. Расчет параметров фокусирующих систем.	Изучение характера и особенностей лазерного воздействия на материал в зависимости от положения фокуса линзы относительно поверхности обрабатываемого образца.
6	4	Термоупрочнение металлов импульсно-периодическим лазерным излучением.	Изучение схем, технологических и энергетических параметров термоупрочнения материалов при помощи импульсно-периодического лазерного излучения. Изучение свойств упрочненных материалов.
7	4	Измерение угловой расходимости лазерного излучения	Определить угловую расходимость лазерного излучения методом сечений и методом фокусировки

Критерии оценки при сдаче зачета

1. К сдаче экзамена допускаются студенты:

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

При наличии пропусков и неудовлетворительных оценок 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 80 - 100 % правильных ответов на зачете и наличии всех защищенных лабораторных работ.

Оценка «не зачтено» - ставится при 30 - 40 % правильных ответов на зачете и отсутствии защиты всех лабораторных работ.

ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

Тема 1. ВВЕДЕНИЕ.

План:

1. Содержание курса и его значение в подготовке физиков.
2. Перспективы развития лазерной техники и технологии.
3. Схемы и конструкции технологических лазеров.
4. Лазерные технологические процессы в микроэлектронике и перспективные направления лазерной обработки материалов.
5. Основные требования по обеспечению безопасности при работе с технологическими лазерами.

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.

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_2 -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.

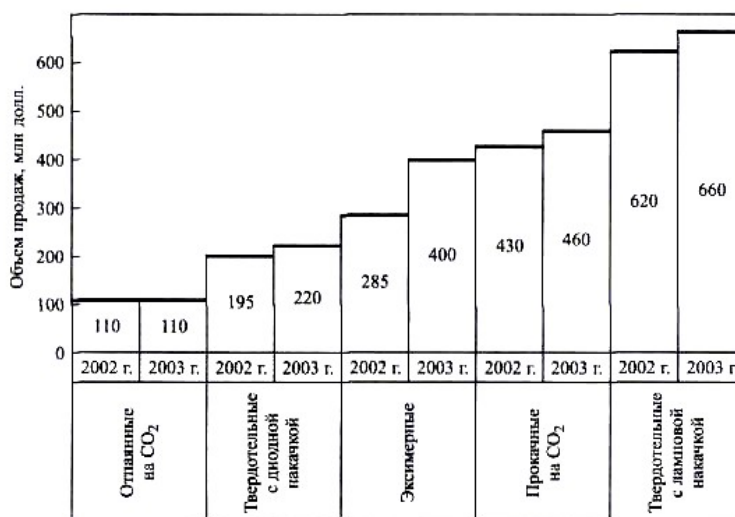


Рис. 1.1. Распределение мирового рынка недиодных лазеров по типам

Высокими темпами растет производство твердотельных лазеров (рис. 1.1). Они превосходят газовые по технологичности, экономичности, массе и габаритным размерам. Их существенным технологическим преимуществом является возможность применения для передачи излучения гибким световодом. Благодаря этому были созданы роботизированные лазерные технологические комплексы (ЛТК), используемые для резки и сварки корпусных элементов сложной пространственной конфигурации.

Еще одним важным преимуществом лазеров является сравнительно простая возможность управления временной структурой излучения. Это осуществляют как путем управления накачкой, так и использованием акустооптических затворов. В ЛТК, выпускаемых С.-Петербургским центром лазерных технологий, в результате этого удалось получить повышение качества и производительности при прошивке отверстий, лазерной гравировке и микросварке.

В последние годы фирмами Nuvonux 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 дальномеры и трехмерные локаторы, аппаратура для телекоммуникаций, медицинские установки и т. д.

На диаграмме, представленной на рис. 1.2, показано применение лазеров для различных видов тепловой обработки.

Объем производства и продаж технологических лазеров год от года неуклонно возрастает (рис. 1.3). Ведущими мировыми производителями лазерной техники являются США, Германия, Япония и Россия. Российские предприятия предлагают почти все виды лазерной техники — от технологических установок для обработки материалов до медицинской аппаратуры, измерительных приборов и телекоммуникационного оборудования. Центры, создающие лазерную технику, находятся в Москве, С.-Петербурге, Новосибирске, Туле. В области мощных технологических CO₂-лазеров и ЛТУ на их основе работают ИПЛИТ РАН

(Шатура), ИСТОК (Фрязино) и ИТПМ РАН (Новосибирск).

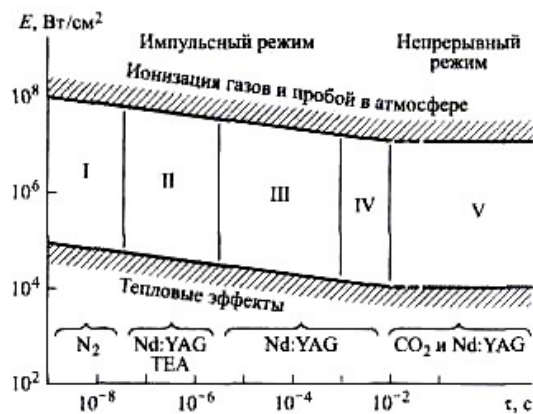


Рис. 1.2. Применение лазеров для различных видов тепловой обработки материалов: I — испарение тонких пленок; II — скрайбирование, испарение пленок; III — сверление отверстий, перфорация; IV — точечная сварка, термообработка; V — глубокое проплавление, газолазерная резка, термообработка, термораскалывание

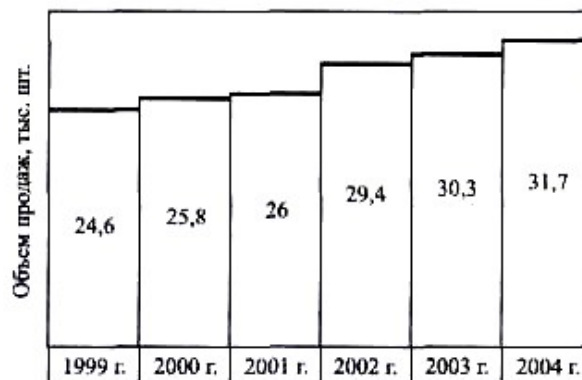


Рис. 1.3. Изменение объема продаж лазеров для обработки материалов во времени

Наиболее широкое промышленное применение получили в основном два класса технологических лазеров: газоразрядные CO₂-лазеры с диффузионным или с конвективным охлаждением рабочей смеси и лазеры с оптической накачкой на твердых кристаллах. Технологические лазеры этих классов в наибольшей степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым при осуществлении лазерной обработки, и условиям промышленной эксплуатации прежде всего по уровню мощности излучения, оптическому качеству лазерного пучка, ресурсу работы, а также экономичности изготовления и эксплуатации лазеров.

В настоящее время для проведения технологических процессов все более широкое применение находят диодные и волоконные лазеры.

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 технологического лазера; 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.

Структурный состав ЛТК представлен на рис. 1.4. В зависимости от вида комплекса в структурном составе ЛТК возможны изменения.

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.

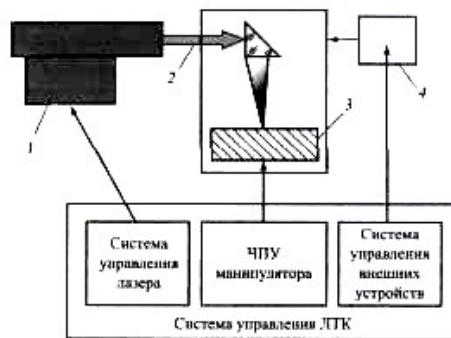


Рис. 1.4. Структурный состав лазерного технологического комплекса: 1 — технологический лазер; 2 — внешний оптический тракт; 3 — манипулятор изделия или оптики; 4 — система управления

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.

СЛТК различают по методу лазерной обработки на предназначенные для сварки, резки, термоупрочнения, наплавки и для прошивки отверстий.

Первые широко используют в автомобилестроении, судостроении, энергомашиностроении и других отраслях промышленности. д.

СЛТК для резки в первую очередь связаны с разделением таких труднообрабатываемых материалов как, например, стекло и керамика. Широкое применение находят СЛТК для лазерного поверхностного упрочнения. Известно большое количество моделей СЛТК для выполнения операций прошивки отверстий с целью получения высокоточных и тонких отверстий в различных материалах: металле, резине, бумаге, керамике, стекле, алмазах и др.

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.).

По форме обрабатываемых изделий УЛК подразделяют на предназначенные для обработки плоских деталей (резка, перфорация листовых материалов и т. д.), тел вращения (резка труб, гравировка прутков и т. д.), а также деталей сложной формы (пространственная обработка, при которой детали или оптические головки перемещаются по сложной траектории по пяти или шести координатам).

По характеру перемещения оптики и изделий УЛК классифицируют на следующие крупные классы:

- 1) с манипулятором изделий, в которых оптика неподвижна, а манипулятор перемещает деталь;
- 2) с манипулятором оптики, в которых деталь неподвижна, а оптика перемещается специальным манипулятором;
- 3) смешанного типа, в которых перемещаются и оптика и деталь;
- 4) с перемещением лазерного излучателя.

УЛК с манипулятором изделий в зависимости от требуемой траектории перемещений подразделяют на системы:

линейного перемещения, оснащенные двух координатными столами или захватами; ротационные, или вертикально-горизонтальные, для вращения деталей в вертикальной и горизонтальной плоскостях; обеспечивающие сложные перемещения деталей, в которых для этой цели используют промышленные роботы или двухкоординатные столы, оснащенные ротационными модулями.

УЛК с манипулятором оптики по характеру траектории движения подразделяют на системы:

линейного перемещения, в которых используют порталные и мостовые схемы; с вращением оптики, в которых применяют вращающиеся зеркала или маски; со сложным перемещением оптики, где используют специальные роботы (системы лазер—робот).

Лазерные технологические комплексы смешанного типа в зависимости от характера перемещения оптики подразделяют на системы:

линейного перемещения оптики на основе порталной схемы (для перемещения деталей используют координатные столы или ротационные системы);

со сложным перемещением оптики, выполненные по схемам: портал и координатный стол; портал и ротационные системы; двухкоординатный портал.

В состав комбинированных систем, кроме лазера, входят другие машины и инструменты. Наибольшее распространение получили УЛК лазер-пресс для резки с револьверным режущим или вырубным прессом небольшой мощности. Сочетание лазера и прессы в одном комплексе существенно расширило возможности при использовании каждого из инструментов.

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.

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 часть 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.

Тема 2. ФОКУСИРОВКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

План:

1. Оптические системы, используемые в технологии лазерной обработки.
2. Общие параметры расчета фокусирующих систем.
3. Фокусировка ЛИ одиночными линзами. Применение эксцентрических линз при фокусировке ЛИ.
4. Расчет параметров зеркальных объективов.

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.

Лазерное излучение, формируемое в резонаторе, характеризуется острой направленностью, т. е. малой угловой расходимостью. Это означает, что энергия лазерного излучения может быть эффективно передана на большое расстояние и сфокусирована на весьма малых площадках.

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.

Практическую ценность при проведении технологических процессов представляет такой показатель, как энергетическая расходимость, определяемая плоским или телесным углом при вершине конуса, внутри которого распространяется заданная доля энергии или мощности пучка излучения. Исходя из этого определения для расчета энергетической расходимости необходимо предварительно обусловить долю мощности, по которой определяется расходимость. В качестве искомого предлагается рассматривать такой угол, в котором распространяется 83,8 % общей мощности луча. Такая доля мощности установлена для возможности сопоставления расходимости луча сплошного сечения, характерного для устойчивых резонаторов, с расходимостью кольцевого луча неустойчивого резонатора.

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

$$W_{0,838} = 1,22\lambda / D \quad (2.1)$$

где λ — длина волны излучения; D — диаметр луча.

Физический смысл формулы (2.1) 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:

$$W_{0,838} \cong 1,2\lambda / t \quad (2.2)$$

где $t = (D - d_B) / 2$

Сопоставление формул (2.1) и (2.2) показывает, что коэффициенты отличаются незначительно. Принципиальная разница этих формул заключается в том, что расходимость лазерного излучения сплошного круглого сечения (выражение (2.1)) определяется диаметром луча, а лазерного излучения кольцевого сечения (выражение (2.2)) — шириной кольца.

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.

В любой лазерной технологии основной задачей является обеспечение относительного перемещения луча и обрабатываемой детали. Эту задачу решают путем разработки как различных способов перемещения лазерного луча в случае обработки тяжелых деталей, имеющих большие габариты, так и необходимых приспособлений для перемещения обрабатываемых деталей, что является рациональным при использовании малогабаритных деталей.

Схема обработки неподвижных деталей по любому заданному контуру в простейшем случае реализуется с помощью двух подвижных зеркал (рис. 2.1). Плоские зеркала 2 и 3 (рис. 2.1) 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 (рис. 2.1, б). В этом случае зеркала колеблются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

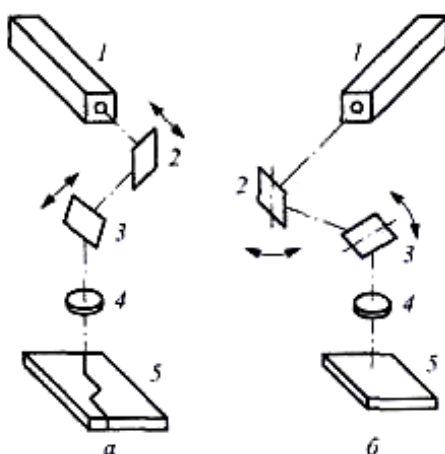


Рис. 2.1. Схема перемещения луча двумя зеркалами:

а — 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 (рис.2.2), 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.

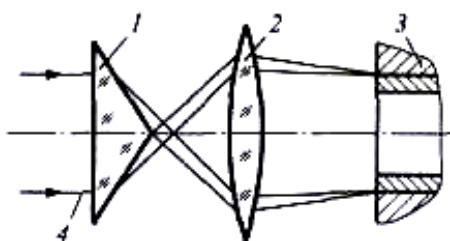


Рис. 2.2. Преобразование излучения сплошного круглого сечения в излучение кольцевого сечения:

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.

В ряде случаев для повышения производительности процесса лазерной обработки, особенно импульсно-периодической обработки, на изделии следует создать вытянутое пятно нагрева. С помощью цилиндрической линзы лазерное излучение можно сфокусировать в линию. Вытянутое пятно также можно получить установкой фокусирующей линзы со смещением оптической оси по отношению к оси лазерного излучения в направлении перемещения деталей при обработке.

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 (рис. 2.3). 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.

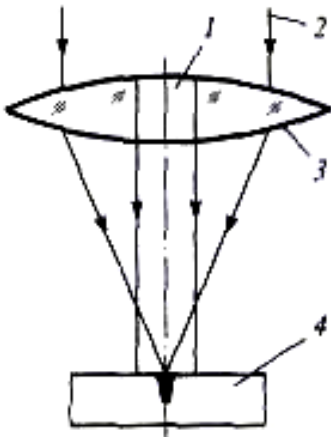


Рис. 2.3. Схема для сварки с подогревом околошовной зоны:

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 (рис. 2.4). 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.

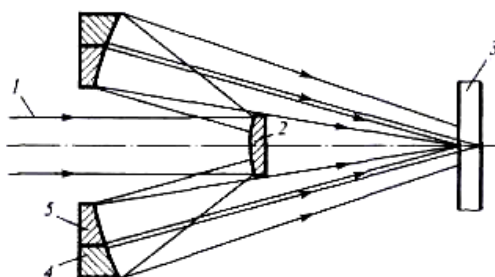


Рис. 2.4. Схема устройства для сварки с подогревом с помощью осесимметричного обращенного объектива Кассегрена:

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

Оптические системы обеспечивают возможность плавного регулирования интенсивности излучения непосредственно в процессе обработки. Это достигается перемещением фокусирующей системы вдоль оси излучения, вследствие чего фокус линзы удаляется или приближается к обрабатываемой поверхности. При этом концентрация энергии в пятне нагрева уменьшается.

Для фокусировки лазерного излучения применяют как прозрачную оптику проходного типа (линзы), так и отражательную металлооптику (зеркала). Фокусирующие прозрачные линзы используют при мощности лазерного излучения до 1 кВт. В случае более высоких значений мощности применяют зеркальные фокусирующие системы из металлооптики, обеспечивающие значительно больший срок их службы.

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 такого объектива представлена на рис. 2.5.

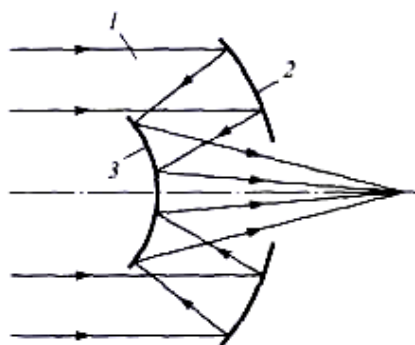


Рис. 2.5. Классическая схема двух-зеркального объектива Кассегрена.

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 (рис. 2.6). В этой схеме экранирование излучения отсутствует и вся энергия излучения независимо от ее распределения по сечению достигает обрабатываемой поверхности.

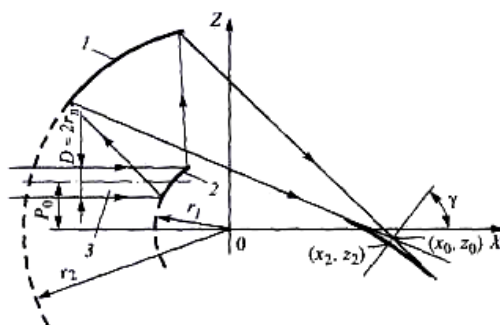


Рис. 2.6. Схема фокусировки лазерного излучения обращенным внеосевым объективом Кассегрена: 1 — большое вогнутое сферическое зеркало; 2 — малое выпуклое сферическое зеркало; 3 — лазерный луч

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.

В лазерах большой мощности применяют принудительное охлаждение медных зеркал

водой для уменьшения тепловых деформаций и повышения их стойкости. Для увеличения стойкости зеркал при хранении и эксплуатации рекомендуется использовать защитные и многослойные просветляющие покрытия.

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.

Представленный анализ различных разработок оптических систем наглядно демонстрирует широкий интерес исследователей к этому важному вопросу, определяющему уровень совершенства лазерной технологии. Для успешной разработки лазерной технологии и оборудования необходимо детальное исследование влияния характеристик оптических фокусирующих систем на технологические параметры. Поскольку эффективность большинства процессов лазерной обработки в значительной степени определяется концентрацией энергии в пятне нагрева, основное внимание при проектировании фокусирующих систем обращается на обеспечение минимальных размеров фокального пятна.

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 (монохроматичность, 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 (рис. 2.8). Входной луч проходит на высоте h_1 параллельно оси линзы ($\gamma_1 = 0$). Линза, изготовленная из материала с коэффициентом преломления n , имеет толщину $d_{л}$ и радиусы кривизны поверхностей r_1 и r_2 .

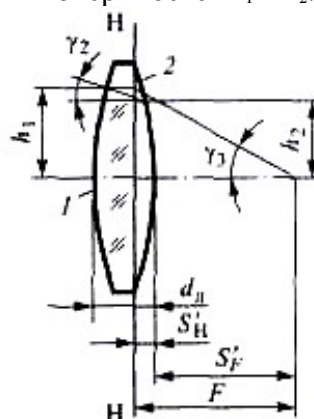


Рис. 2.8. Схема прохождения луча через линзу (Н—Н — главная плоскость линзы)

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 aberrации, возникающие вследствие зависимости показателя преломления от длины волны, отсутствуют. Это позволяет в дальнейшем рассматривать лишь монохроматические aberrации.

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.

Расчет параметров оптической системы, удовлетворяющих заданным технологическим условиям, т. е. заданным величинам aberrаций, сводится таким образом к многократно повторяемым расчетам хода лучей для различных вариантов, в которых варьируются те или иные параметры оптической системы для получения заданной aberrации. Такой способ расчета является трудоемким, его можно осуществить в численном виде на ЭВМ.

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:

$$\delta q' = \sum_{k=1}^k \frac{P_k (D/2)^3}{2F^2} \quad (2.3)$$

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_n следует учитывать, что он складывается из составляющей d_w , обусловленной расходимостью, и составляющей d_a , вызванной aberrациями:

$$d_n = d_w + d_a$$

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

$$d_a = P^* D^3 / (32F^2) \quad (2.4)$$

Анализ формулы (2.4) 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 (2.4), 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:

$$d_{\text{П min}} = 0.67D(P^*)^{1/3}(\epsilon\lambda/t)^{2/3} \quad (2.5)$$

Анализируя формулу (2.5), можно найти некоторые пути дополнительного уменьшения минимального диаметра фокального пятна $d_{n \text{ min}}$. Основной из них состоит в использовании фокусирующих систем с пониженными aberrациями. Кроме того, для уменьшения $d_{n \text{ min}}$, 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 эксцентричных линз для фокусировки лазерного излучения

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.

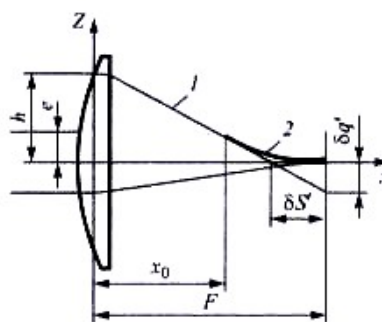


Рис. 2.9. Схема фокусировки луча эксцентричной линзой:
1 — диаметральный луч; 2 — каустическая кривая

Ход лучей после линзы можно описать двумя уравнениями:

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

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 параболидаидального и гиперболидаидального 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:

$$r_1 = 1.236F \quad (2.6)$$

$$r_2 = 3.236F = 2.618r_1 \quad (2.7)$$

$$L = r_2 - r_1 \quad (2.8)$$

Выражение (2.8) означает, что оно записано для случая, когда зеркала расположены концентрически. Объектив с соотношением параметров (2.6)-(2.8) является наилучшим при обеспечении минимума aberrаций из всех подобных объективов со сферическими зеркалами.

Большую перспективу при лазерной обработке представляют внеосевые обращенные объективы Кассегрена (см. рис. 2.6). Использование таких объективов позволяет обеспечить отсутствие экранирования при

$$P_0 > 2.618r_{\text{л}}$$

где P_0 — расстояние оси луча от оси объектива; $r_{\text{л}}$ — 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 (см. рис. 2.6).

Тема3. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МАТЕРИАЛАМИ.

План:

1. Энергетические условия взаимодействия ЛИ при обработке материалов.
2. Плазменные процессы при лазерной обработке.
3. Тепловые процессы при лазерном воздействии.

Энергетические условия взаимодействия лазерного излучения при обработке материалов

Лазерная обработка материалов основана на том, что использование лазерного излучения позволяет создавать на малом участке поверхности высокие плотности теплового потока, необходимые для интенсивного нагрева или расплавления практически любого материала.

При воздействии на поверхность обрабатываемых металлов и сплавов часть потока лазерного излучения отражается от нее, а остальная часть проникает на малую глубину. Энергия лазерного излучения практически полностью поглощается электронами в приповерхностном слое толщиной $10^{-6} \dots 10^{-7}$ м. Вследствие этого электронная температура T_e

резко повышается, тогда как температура кристаллической решетки T_i остается незначительной.

С течением времени интенсивность передачи энергии свободных электронов кристаллической решетки повышается. Начиная со времени релаксации $\tau_p = 10^{-9} \dots 10^{-11}$ с, разность температур $(T_e - T_i)$ становится минимальной и тепловые процессы в металле можно охарактеризовать общей температурой T_0 . Последующий нагрев металла осуществляется по физическим закономерностям, присущим традиционным способам теплового воздействия на металлы. Это дает основание рассматривать распространение теплоты в металлах при лазерной обработке с использованием теории теплопроводности. Процессы распространения теплоты зависят от интенсивности теплового воздействия и в значительной степени — от теплофизических свойств материала.

Коэффициент теплопроводности λ_T , характеризует свойство материала проводить теплоту, т. е. тепловой поток в материале при действии поверхностного источника нагрева, вызванного лазерным излучением, зависит от коэффициента теплопроводности этого материала. Другим теплофизическим параметром, также определяющим интенсивность теплового потока в материале, является его теплоемкость, в частности, объемная теплоемкость c_V

Комплексной характеристикой теплофизических свойств материала является коэффициент температуропроводности $a = \lambda_T / c_V$, который в целом характеризует скорость выравнивания температуры при нестационарной теплопроводности. Коэффициент температуропроводности определяет, с какой скоростью в материале происходит передача тепловой энергии. Чем выше коэффициент температуропроводности, тем больше глубина проникновения теплового потока и, в частности, больше глубина проплавления при прочих равных условиях.

Для источника, равномерно распределенного по поверхности, глубину проникновения теплового потока можно ориентировочно определить как $\delta = 2\sqrt{at}$. Из этой формулы видно, что время проникновения теплового потока на глубину δ можно найти по выражению $t_{np} = \delta^2 / (4a)$.

Энергию лазерного излучения, проникшего в материал на глубину x , можно описать экспоненциальным законом Бугера—Ламберта

$$W(x) = W(1 - R_{omp})e^{-k_{пог}x}$$

где W — энергия лазерного излучения, сконцентрированного на поверхности обрабатываемого материала; $k_{пог}$ — коэффициент поглощения лазерного излучения в материале.

Механизм поглощения лазерного излучения в диэлектриках и в большинстве полупроводников принципиально отличается от такового в металлах тем, что поглощение излучения происходит на длине L , которая может быть значительно больше, чем толщина скин-слоя.

При наличии микронеровностей реальных поверхностей материалов характер поглощения лазерного излучения может существенно измениться, поскольку вследствие дифракции возникают поверхностные электромагнитные волны (ПЭВ).

Основным показателем, определяющим эффективность поглощения лазерного излучения металлами, является состояние поверхности. В целом с увеличением степени шероховатости поверхности и изменением ее химического состава энергетическая эффективность процессов лазерной обработки значительно повышается.

На практике технологическая операция увеличения степени шероховатости поверхности с целью повышения эффективности лазерной обработки не всегда оправдана. При поверхностной обработке, особенно при обработке гладких шлифованных поверхностей, для увеличения эффективности поглощения лазерного излучения более целесообразно нанесение покрытий.

При выборе покрытия необходимо руководствоваться рядом критериев, среди которых основным является высокая поглощательная способность. Покрытие должно быть простым в изготовлении, дешевым, легко наносимым на поверхность, нетоксичным, стабильным при хранении и обладать высокой адгезионной способностью. Кроме того, покрытие должно иметь достаточно высокую температуру плавления и испарения, а также высокую теплопроводность для обеспечения подвода энергии к обрабатываемому металлу.

В настоящее время используют следующие типы покрытий.

Химические покрытия. Их применяют в промышленности для увеличения коррозионной стойкости (Fe_3O_4 , Fe_2S_3 , Al_2O_3). Использование этих пленок позволяет повысить поглощение энергии лазерного излучения на 20...80 %. Недостатками химических покрытий являются токсичность растворов, воздействие испарений на аппаратуру, крупногабаритность оборудования, а также необходимость погружения всей детали в раствор.

Углеродистые покрытия. К ним относятся сажа, получаемая при сгорании органических материалов, и коллоидные растворы графита или сажи в ацетоне, уайт-спирите и других растворителях. Такие покрытия неравномерны по толщине и имеют слабую адгезию с поверхностью.

Лакокрасочные покрытия. В их число входят вододисперсионные краски, гуаши, туши и грунтовки. При лазерной термообработке наибольшее применение нашли краски на основе углерода (черные) либо на основе оксидов (цветные).

Водорастворимые краски. Эти краски разработаны специально для лазерной термообработки. Они содержат компоненты, обладающие высокой поглощательной способностью, а именно: силикат натрия, оксид цинка, метилцеллюлозу, а также поверхностно-активные вещества.

Порошки мета/шов или оксидов, напыленные на поверхность. Обычно напыление осуществляют в вакууме или гальванически осаждают медь, вольфрам, титан и кремний.

Эффективность того или иного вида лазерной обработки в первую очередь определяется плотностью мощности лазерного излучения в зоне обработки E . При $E = 10^4..10^5$ Вт/см² происходит активный локальный разогрев материала до некоторого температурного стационарного состояния, при котором заметного испарения или разрушения материала не происходит. В данном случае можно принять, что на поверхности обрабатываемого тела в зависимости от концентрации излучения действует точечный или распределенный источник теплоты с плотностью мощности

$$q_{\text{л}} = AE \quad (3.1)$$

Такой источник теплоты обычно используют для термической обработки поверхностей с оплавлением и без него, наплавки, легирования, а также для сварки металлов небольшой толщины. Коэффициент поглощения для различных металлов в процессах лазерной наплавки и сварки малых толщин оказывается меньше ($A \leq 0,35$), чем при термообработке с применением специальных поглощающих покрытий.

В основном коэффициент поглощения $A = 0,5..0,6$, иногда в результате действия эффекта пристеночной самофокусировки он приближается к 1,0. Этот эффект заключается в том, что при многократном отражении лазерного излучения от стенок глубокого и узкого канала происходят периодическое увеличение плотности мощности по оси пучка и, как следствие, — дополнительное углубление канала. В ряде случаев предельные значения коэффициента поглощения не зависят от физических свойств металла, состояния его поверхности и химического состава среды.

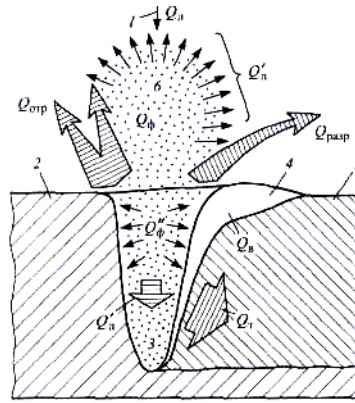


Рис. 3.1. Схема энергозатрат в установившемся режиме проплавления металла сфокусированным лазерным излучением:

1 — сфокусированный луч лазера; 2 — основной металл; 3 — кратер (парогазовая каверна); 4 — жидкий металл; 5 — переплавленный металл (сварной шов); 6 — плазменный факел

Вызывает интерес распределение энергии лазерного излучения в общем случае установившегося режима проплавления (рис. 3.1). Связь между основными источниками энергии и различными видами энергозатрат можно выразить с помощью следующих уравнений баланса:

$$Q'_L = Q_L - (Q_\Phi + Q_{отр} + Q_{разр}), Q_\Phi = Q'_\Phi + Q''_\Phi, Q'_L + Q'_\Phi = Q_B + Q_T$$

Где Q'_L - энергия лазерного луча, поглощенная в процессе фотонных и электронных соударений на стенках канала; Q_L - энергия сфокусированного лазерного излучения; Q_Φ - энергия, поглощенная в объеме плазменно-парового факела внутри кратера и над его поверхностью; Q'_Φ - энергия, рассеиваемая в окружающую среду излучением из плазменного факела; Q''_Φ - часть энергии Q_Φ факела, поглощаемая стенками канала в результате конвективного и лучистого теплообмена; $Q_{отр}$ - энергия лазерного луча, отраженная от поверхности основного металла и дна кратера; $Q_{разр}$ - полная энергия продуктов разрушения, уносимая реактивной парогазовой струей; Q_B - полное теплосодержание жидкого металла в сварочной ванне; Q_T - энергия, отводимая вглубь основного и переплавленного металла вследствие теплопроводности.

Эффективность передачи энергии лазерного излучения обрабатываемому материалу определяется эффективным коэффициентом поглощения, который фактически характеризует эффективный КПД процесса лазерной обработки. Приближенное значение этого коэффициента определяется:

$$A_{эф} = \eta_{эф} = (Q'_L + Q''_\Phi) / Q_L$$

Плазменные процессы при лазерной обработке

Для достижения высокой производительности и качества обработки в технологических процессах лазерной сварки, резки, наплавки, термообработки и других необходимо использовать лазерные установки большой мощности и высокой плотности мощности излучения, характеризующей высокую концентрацию энергии на обрабатываемом участке поверхности. На сегодняшний день лазерное излучение представляет собой наиболее концентрированный источник энергии, используемый в технологических целях. При лазерном излучении концентрация энергии превосходит таковую в случае применения широко распространенной электронно-лучевой обработки. Однако при равных затратах энергии, т. е. при одинаковой мощности излучения, использование электроннолучевой обработки позволяет обеспечить большую глубину проплавления по сравнению с лазерной.

В первую очередь это связано с различным характером взаимодействия потоков электронов при электронно-лучевой обработке и потоков фотонов при лазерной обработке с металлической поверхностью. Кроме того, существует принципиальное различие при проведении технологических процессов. При этом состав газовой среды для конкретной технологии и обрабатываемого материала подбирают так, чтобы обеспечить защиту поверхности металла, нагреваемого до высоких температур.

Образование лазерной плазмы обуславливает существенное изменение оптических свойств среды, в которой распространяется лазерное излучение. Обычно это изменение связывают с изменением расходимости светового пучка. В определенных условиях эти закономерности могут приводить к уменьшению расходимости, т. е. к самофокусировке света.

При обобщении различных представлений о плазменных процессах вблизи поверхности материала, обрабатываемого лазерным излучением, было определено, что приповерхностная плазма представляет собой эрозионный факел продуктов разрушения обрабатываемого участка, оптический разряд в парах материала и оптический разряд в газе, окружающем обрабатываемый образец или деталь. Эрозионный факел в основном не создает сопротивления прохождению через него лазерного излучения, он практически прозрачен. При дальнейшем возрастании плотности мощности излучения наблюдается резкое увеличение степени поглощения лазерного излучения в плазме и повышение температуры плазмы.

В процессе лазерной обработки, осуществляемой с нагревом до высоких температур, близких к температурам плавления легированных сталей и других высокоактивных металлов и сплавов, в качестве защитного газа применяют одноатомные инертные газы — аргон и гелий. При тепловой обработке, в том числе и лазерной, низколегированных сталей и целого ряда конструкционных материалов защитной средой являются углекислый газ, азот и воздух. В результате тщательного исследования влияния состава защитного газа на глубину проплавления при лазерной сварке было установлено, что при прочих равных условиях состав газа в зоне взаимодействия лазерного излучения с металлом оказывает существенное влияние на эффективность проплавления.

Качественный характер изменения глубины проплавления при сварке в смеси инертных газов обусловлен различными значениями пороговой мощности, необходимой для поддержания оптического разряда в газе переменного состава. При мощности лазерного излучения P , превышающей пороговую мощность для данного газа, образуемая в области каустики пучка плазма может распространяться по световому лучу. Холодный газ, прилегающий к поглощающему слою плазмы со стороны источника излучения (рис. 2.7), нагревается до высокой температуры.

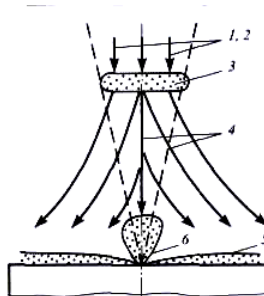


Рис. 3.2. Схема распространения облака ионизированного газа: 1 - лазерное излучение; 2 — холодный газ; 3 — ионизированный газ; 4 — нагретый газ; 5 — пограничный слой; 6 — пары металла

При этом он начинает поглощать энергию светового пучка, в результате чего поглощающий слой плазмы перемещается в направлении источника излучения. Перемещение плазмы в конусе сфокусированного луча происходит до тех пор, пока

поглощаемая мощность компенсирует потери энергии на теплоотвод из области высоких температур и потери на излучение. Передний фронт плазмы останавливается на некотором расстоянии $l_{пл}$ от каустики пучка, где плотность мощности лазерного излучения еще обеспечивает компенсацию потерь энергии в окружающую среду. Ориентировочно значение $l_{пл}$ можно определить по выражению

$$l_{пл} = \pi r_0^2 \lambda^{-1} \sqrt{P - (P_t + P_r) / P_r}$$

где r_0 — радиус минимального пятна фокусировки; λ — длина волны лазерного излучения; P — мощность лазерного излучения; P_t , P_r — характерные мощности, связанные с потерями энергии на теплопроводность и излучение соответственно.

При проникании лазерного излучения через плазму к фокусу его плотность мощности, с одной стороны, вследствие схождения фокусируемых лучей повышается, а с другой стороны, в результате поглощения — снижается. Ослабленный при прохождении через плазму луч при определенных условиях формирует еще один оптический разряд в сечении конуса, в котором плотность мощности достигает критического значения. Если создать условия для погашения первоначальной волны горения, например при переходе из защитного газа аргона в окружающий воздух, то над поверхностью обрабатываемых деталей сформируются волны горения, которые последовательно перемещаются одна за другой в направлении источника излучения.

Тепловые процессы при лазерном воздействии

Оптимальные режимы лазерной обработки позволяют в полной мере использовать основные ее достоинства, а именно высокую степень концентрации энергии и максимальную эффективность ее применения.

Эффективную тепловую мощность q , выражающую количество теплоты, поступившей в металл за единицу времени при том или ином виде лазерной обработки:

$$q = \eta_{эф} P \tag{3.2}$$

где P — мощность лазерного излучения, $\eta_{эф}$ — эффективное КПД.

В формуле (3.2) $\eta_{эф}$ — отношение количества теплоты, поступившей в металл за единицу времени, к мощности лазерного излучения, воздействующего на обрабатываемую поверхность. Этот коэффициент характеризует эффективность процессов выделения теплоты и теплообмена.

В случае поверхностной термообработки без расплавления физический смысл эффективного КПД совпадает с физическим смыслом коэффициента поглощения A , а при лазерной обработке с расплавлением металла — эффективного коэффициента поглощения $A_{эф}$. Однако удобнее пользоваться единым понятием эффективного КПД $\eta_{эф}$, однозначно определяющим эффективность любого процесса лазерной обработки.

Для тех видов лазерной обработки, которые связаны с прославлением металла, эффективность использования поступившей в металл тепловой энергии характеризуется термическим КПД, который представляет собой отношение количества теплоты, необходимой для проплавления, ко всей теплоте, поступившей в изделие или образец:

$$\eta_T = v F_{np} S_{пл} / q \tag{3.3}$$

где v — скорость лазерной обработки; F_{np} — площадь поперечного сечения проплавленной зоны металла; $S_{пл}$ — удельное объемное теплосодержание расплавленного металла, включая скрытую теплоту плавления.

Использование введенных понятий эффективного и термического КПД процессов лазерной обработки материалов позволяет однозначно характеризовать оптимальные режимы обработки, обеспечивающие максимальную эффективность использования энергии лазерного излучения и высокую производительность расплавления материала, т. е. высокие значения эффективного и термического КПД.

Теоретическая оценка уровня эффективного КПД на основе этой модели имеет приближенный характер, требуется ее экспериментальное уточнение. Надежные

экспериментальные данные о тепловой эффективности реальных процессов лазерной сварки практически отсутствуют; в ряде публикаций они противоречивы.

Использование установленных закономерностей тепловой эффективности процесса лазерной сварки позволяет сформулировать рекомендации по выбору мощности лазерного излучения. В общем случае наиболее рационален интенсивный режим лазерной сварки, характеризуемый максимальной производительностью и энергоемкостью. При этом скорость сварки определяется положением экстремума $\eta_{\text{эф}}$ обеспечивающего высокую эффективность энергетических затрат, приходящихся на единицу длины шва.

В физическом смысле $\eta_{\text{т}}$ определяет долю энергии, затрачиваемой на расплавление металла, и характеризует сумму потерь, обусловленных теплопередачей в твердой фазе и перегревом жидкого металла. Исходя из этого можно прогнозировать характер изменения $\eta_{\text{т}}$ в зависимости от скорости сварки. Если источник теплоты перемещается с малой скоростью, то значительная часть энергии вследствие теплопроводности распределяется по объему металла (в том числе и в направлении движения источника), что вызывает существенный подогрев металла в твердой фазе, окружающей расплавленную зону. При этом эффективность проплавления невысока. В случае увеличения скорости сварки основные потоки теплоты распространяются в направлении, перпендикулярном шву, и потери, обусловленные теплопроводностью, снижаются, а $\eta_{\text{т}}$ повышается.

При разработке технологического процесса лазерной сварки в производственных условиях практический интерес представляют влияние отклонений параметров от заданного режима на формирование шва и качество сварного соединения. В частности, изменение положения фокальной плоскости оптической системы относительно поверхности свариваемого изделия может быть вызвано неточностью настройки или выходом из плоскости свариваемых кромок. В результате отклонения условий фокусировки, как известно, концентрация энергии на свариваемых кромках и характер плазменных процессов в факеле изменяются. В связи с этим важна оценка влияния изменения положения фокальной плоскости оптической системы на эффективность поглощения лазерного излучения.

Значительное повышение эффективности проплавления лазерным лучом достигается при лазерной сварке в режиме осциллирования сфокусированного излучения. Осциллирование осуществляется путем периодического заглужения фокуса луча в сварочную ванну при согласовании скорости перемещения фокуса со скоростью фронта плавления и испарения на передней стенке парогазового канала. В процессе сварки сталей, титановых и алюминиевых сплавов при постоянном уровне мощности лазерного луча только в результате установления режима осциллирования сфокусированного излучения термический КПД повышается приблизительно на 60...80%, тогда как эффективный КПД сварки — лишь на несколько процентов. Это позволяет обеспечить увеличение глубины проплавления до 40 % по сравнению с таковым при использовании общепринятой схемы лазерной сварки с фиксированной фокусировкой, когда расположение фокуса излучения относительно поверхности деталей остается неизменным.

Процесс распространения теплоты Q мгновенного сосредоточенного источника, выделившейся на поверхности полубесконечного тела в начальный момент времени $t = 0$ в точке (мгновенный точечный источник), можно описать уравнением

$$T(R, t) = \frac{2Q}{c\gamma (4\pi at)^{3/2}} e^{-R^2/(4at)} \quad (3.4)$$

где $a = \lambda_{\text{т}}/(c\gamma) \sim$ коэффициент температуропроводности; $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ — квадрат расстояния от источника теплоты до произвольной точки тела с координатами x , y и z .

Формулу (3.4) можно использовать для приближенного расчета температур при кратковременном действии лазерного источника на поверхности массивного тела.

Процесс распространения теплоты Q мгновенного линейного источника, выделившейся в тонкой пластине толщиной δ с равномерным распределением по толщине в начальный момент времени $t = 0$ в точке, можно выразить уравнением

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi \lambda_r \delta t^{3/2}} e^{-r^2 / (4at) - bt} \quad (3.5)$$

где $z^2 = x^2 + y^2$ — квадрат расстояния от источника теплоты до произвольной точки с координатами x и y ; $b = 2a_T / (c\gamma\delta)$ — коэффициент температуропотдачи, учитывающий поверхностную теплоотдачу в окружающую среду.

С помощью формулы (3.5) можно определить приближенные значения температур при кратковременном действии линейного лазерного источника нагрева, например, при импульсном или кратковременном непрерывном излучении, применяемом при сварке точечного соединения в пластинах.

Если точечный или линейный источники действуют какое-то произвольное время t , то можно использовать принцип наложения температур, заключающийся в интегрировании уравнений (3.4) или (3.5) по t .

Представленные аналитические выражения просты, их удобно использовать для описания тепловых процессов при различных условиях лазерной обработки материалов. Однако результаты расчетов по этим формулам не всегда хорошо согласуются с экспериментальными данными, так как в реальных процессах лазерного нагрева теплофизические свойства непостоянны. Практическое применение рассмотренных формул, полученных в линейной постановке задачи, ограничивается оценочными расчетами температур в области нагрева ниже температур плавления металлов.

Более точные результаты расчетов можно получить при учете характера изменения теплофизических свойств материала в условиях быстрого нагрева и охлаждения при лазерной обработке. При этом возникает необходимость решения нелинейных дифференциальных уравнений теплопроводности. Решения задач еще более усложняются тем, что источник теплоты вследствие зависимости поглощательной способности от температуры также дополнительно вносит нелинейность. В общем случае к этому добавляется нелинейность граничных условий. Таким образом, уравнения теплопроводности применительно к лазерной обработке представляют собой сложную систему нелинейных дифференциальных уравнений.

Экспериментальное исследование механизма глубокого проплавления

Лазерную сварку в отличие от электронно-лучевой осуществляют в газовой атмосфере, она характеризуется значительным отражением светового потока от обрабатываемой поверхности.

С целью уточнения механизма образования канала проплавления было проведено моделирование процесса проплавления лазерным излучением на образцах из прозрачных материалов со скоростной киносъемкой процесса. В качестве модели были выбраны образцы из ситалла марки С0-115М, имеющего в отличие от обычных стекол и других полимерных материалов коэффициент линейного расширения, близкий к нулю, и вследствие этого, — высокую лучевую стойкость. Внешний вид проплавления на ситалле аналогичен таковому при проплавлении на металле, так как ситалл имеет поликристаллическую структуру с малым содержанием стекловидной фазы и обладает стойкостью против сублимации. Характерный вид кинограммы в произвольный момент времени при проплавлении дает представление о геометрии канала проплавления и зоны расплава в продольном сечении по оси шва (рис. 3.3).

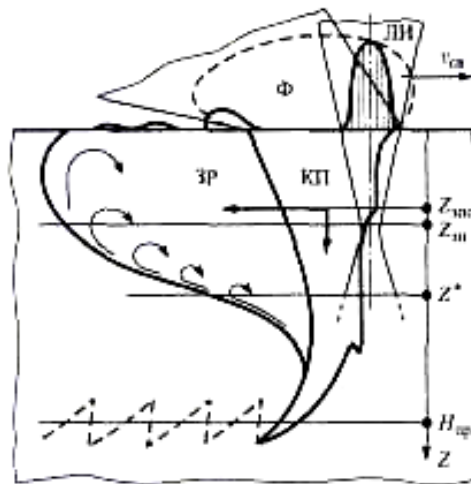


Рис. 3.3. Геометрия канала проплавления КП и зоны расплава ЗР в продольном сечении по оси шва (ЛЛ — сфокусированное лазерное излучение; Ф — факел над поверхностью; $Y_{1\phi}$ — глубина проплавления; $Z_{ТМ}$ — тона прямого облучения; $Z_{„}$ — зона перетяжки сфокусированного излучения; Z^* — граница области устойчивого и неустойчивого проплавления).

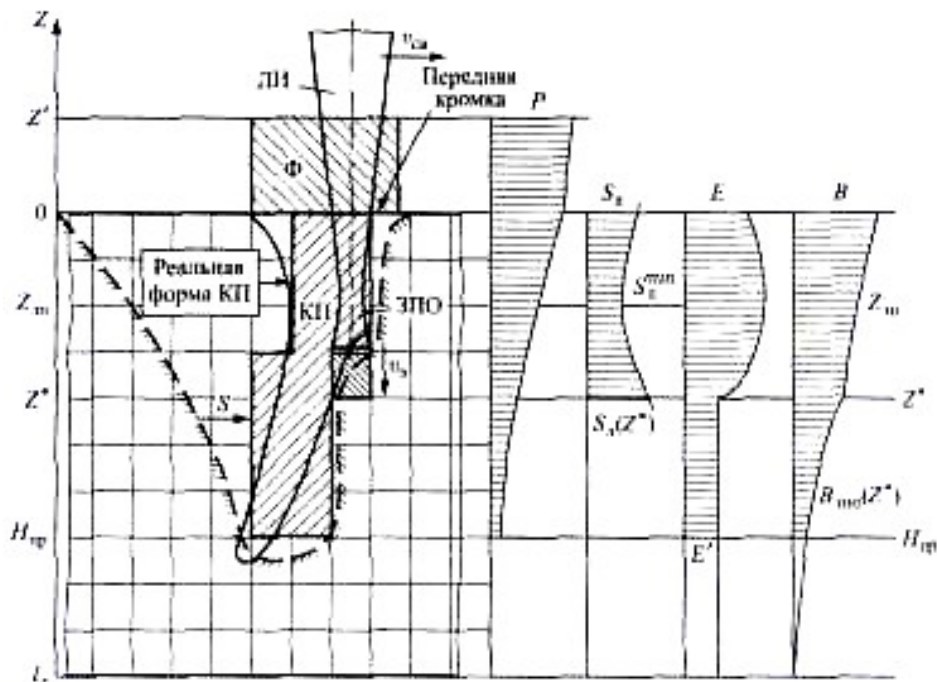


Рис. 3.4. Модель лазерной сварки в режиме глубокого проплавления

На кинограммах в жидкой ванне можно отчетливо различить две области. Область в верхней части при $z \leq z^*$ (см. рис. 3.3) характеризуется устойчивым проплавлением, в нижней же части ($z \geq z^*$) периодически с частотой того же порядка, что и частота заглупления фронта плавления, возникают пики проплавления. Максимальное тепловыделение отмечается в зоне перетяжки сфокусированного лазерного излучения ($z = z_{3,n}$).

В начальный момент заглупления ширина расплавляемого слоя материала на поверхности определяется условиями фокусировки лазерного излучения и в первом приближении может быть принята равной диаметру сечения пучка излучения на входе в канал проплавления. По мере заглупления ширина расплавляемого слоя материала уменьшается.

Периодический перенос расплавленного материала с передней стенки канала в виде дискретных порций представляет собой динамическое воздействие, вызывающее вихреобразное движение жидкости вдоль задней стенки ванны снизу вверх, что отчетливо видно на кинограммах. Вследствие этого возникают незначительные хаотические колебания поверхности расплава.

Физическая модель процесса глубокого проплавления. Установленные закономерности проплавления стали основой для создания расчетной модели кинетики тепловых процессов при лазерной сварке с глубоким проплавлением, разработанной А.Г. Григорьянцем и А.Н. Трофимовым.

Рассмотрим ход лазерных лучей в канале проплавления. Оптическая система фокусировки создает геометрически направленный ход лучей, определяемый законами оптики. Однако по мере заглублиения излучения в парогазовую среду канала проплавления происходят рефракция на различных неоднородности среды и переотражение от стенок канала, нарушающие оптический ход лучей. Количественное описание указанных процессов весьма сложно, но учитывать их необходимо.

В данной модели рассмотрен предельный случай, когда в парогазовом канале установлены две расчетные области, разделенные по высоте критическим сечением z (см. рис. 3.4), где рефракция и расфокусировка излучения незначительны, а поглощение излучения определяется условиями начальной фокусировки. Была использована эпюра хода лучей $S_{л}(z)$, рассчитанная для конкретных условий фокусировки по соответствующей методике. Расчетная эпюра $S_{л}(z)$ изображена на рис 3.4 для конкретного случая излучения с апертурой $D = 40$ мм и расходимостью $W_{0,838} = 2 \cdot 10^{-3}$ рад, фокусируемого внеосевым объективом Кассегрена с фокусным расстоянием $F = 90$ мм. Тогда плотность мощности в верхней части каната проплавления при $z \leq z^*$ можно найти по следующему выражению:

$$E(z) = P(z) / [S_{л}(z)],$$

где $S_{л}(z)$ - площадь сечения

Положение критического сечения z^* находят по соотношению

$$E(z^*) = E' = P(z^*) / [S_{л}(z^*)]$$

В нижней расчетной области канала при $z > z^*$ принимаем, что исходная оптическая фокусировка вследствие рефракции и переотражения от стенок канала полностью нарушена.

Следует отметить, что для обеспечения глубокого проплавления плотность мощности излучения на поверхности $z = 0$ должна быть больше критической ($E(0) > E'$).

Рассмотрим геометрию канала. В критическом сечении ($z = z^*$) ширина канала B равна ширине луча. В нижней части канала ширина определяется из условия постоянства плотности мощности вследствие автоколебательного характера воздействия излучения, т. е. ширина этой части канала изменяется по экспоненциальному закону аналогично характеру изменения мощности излучения. В верхней части принимаем, что ширина каната также изменяется экспоненциально от некоторого значения выходного отверстия канала $B(0)$ на поверхности $z = 0$ до $B(z^*)$.

Ширина канала

$$B(z) = \begin{cases} P(Z) / (E' h_{зпо}), & z \leq z^* \\ B(0) [B(z^*) / B(0)]^{z/z^*}, & z > z^* \end{cases}$$

где $h_{зпо}$ — высота зоны прямого облучения.

В расчетную модель для уточнения необходимо ввести скорость заглублиения зоны прямого облучения на передней стенке канала.

Скорость заглублиения на передней стенке канала определяется:

$$v_3(z) = \frac{\alpha_{л}(1 - \alpha_{р})E(z)\eta}{\gamma_{ж}(L_{пл} + \Delta L_{исп})}$$

где a_n — коэффициент поглощения излучения поверхностью передней стенки канала; α_R — коэффициент потерь за счет объемной теплопроводности и радиации; η — коэффициент снижения мощности источника; $\gamma_{ж}$ — плотность расплавленного металла; $L_{пл}$, $L_{исп}$ — удельная теплота плавления и испарения металла соответственно; Δ — доля объема испарившегося металла.

Одним из элементов модели является условие переноса жидкого металла с передней стенки канала, который, как было установлено экспериментально, имеет дискретный характер. Так как при малой толщине пленки сила отдачи паров уравнивается поверхностными силами, перенос металла из зоны прямого облучения на передней стенке канала после образования жидкой пленки начинается не сразу. С увеличением толщины жидкой пленки ее поверхность деформируется. При определенной толщине она как бы выдавливается из-под луча, в результате чего происходит перенос расплавленного и перегретого металла по боковым стенкам канала проплавления.

Это дает основание в расчетной модели сохранить координату x источника лазерного излучения неизменной в период заглабления. При этом снижение мощности источника вследствие горизонтального перемещения лазерного луча с расчетной площадки зоны прямого облучения можно учесть модельным параметром

$$\eta = 1 - t/t_3$$

где t — время заглабления ($0 \leq t \leq t_3$); $t_3 = 2\sqrt{S_L(0)/\pi} / v_{CB}$ — время прохождения зоны прямого облучения от поверхности до дна канала проплавления; S_L — площадь сечения луча на уровне поверхности пластины ($z = 0$, см. рис. 3.4).

В момент времени $t = t_3$ в результате действия лазерного луча образуется зона прямого облучения на следующем участке поверхности, сдвинутом по оси x , после чего процесс проплавления передней стенки канала повторяется по глубине сверху вниз.

Таким образом, на передней стенке канала проплавления выделяется часть энергии излучения, пропорциональная величине $(1 - \eta)$. Кроме того, при наличии факела энергия рассеивается, переизлучается в окружающее пространство и действует на образец как поверхностный источник с плотностью мощности

$$E_\phi [P - P(0)] \frac{d_\phi}{2d_\phi + 4z'} / [\pi \left(\frac{d_\phi}{2}\right)^2]$$

где P — мощность падающего излучения; $P(0)$ — мощность на входе в канал проплавления ($z = 0$); d_ϕ — диаметр факела, определяемый размером луча на входе в канал проплавления.

Особенностью глубокого проплавления при лазерной сварке является то, что температура стенок канала по глубине изменяется мало. Однако мощность излучения, поглощаемого в канале проплавления, по глубине канала экспоненциально уменьшается. Это кажущееся противоречие разрешают в принятой модели введением зависимости скорости заглабления от глубины канала. В нижней части канала проплавления, в которой мощность излучения ниже, скорость заглабления уменьшается, и площадь зоны прямого облучения подвергается воздействию источника в течение длительного времени.

Таким образом, в рассмотренной модели синтезированы существующие представления и экспериментально установленные особенности сложных физических процессов, происходящих при воздействии лазерного излучения при сварке с глубоким проплавлением. В дальнейшем была выполнена математическая интерпретация основных физических процессов, что позволило создать математическую модель глубокого проплавления при лазерной сварке.

На самостоятельное изучение:

1. Математическая модель процесса глубокого проплавления

2. Сварка встык тонких пластин
3. Сварка массивных деталей с неполным проплавлением
4. Термообработка плоских и цилиндрических поверхностей
5. Термообработка поверхности плиты
6. Термообработка цилиндрических поверхностей
7. Термообработка сканирующим лучом
8. Осесимметричный нагрев тела вращения

Тема 4. ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПРЕВРАЩЕНИЯ В МЕТАЛЛАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

План:

1. Деформации и напряжения при лазерной обработке.
2. Теоретические и экспериментальные методы определения деформаций и напряжений.
3. Особенности распределения остаточных деформаций и напряжений.
4. Технологическая прочность металлов при лазерной обработке.

Деформации и напряжения при лазерной обработке

При лазерной обработке в металлах происходят термодиформационные и физико-химические процессы. Под термодиформационными процессами следует понимать упругопластическое деформирование металла вследствие неравномерного нагрева при лазерной обработке и возникновение при этом временных и остаточных напряжений. Физико-химические процессы при лазерной обработке происходят в твердом и расплавленном металле и характеризуются фазовыми и структурными превращениями, растворением и выделением веществ из раствора, диффузией и т. д.

Термодиформационные процессы и превращения в металлах при лазерной обработке определяют технологическую прочность металла в различных зонах воздействия, т. е. стойкость против образования локальных разрушений при сварке, наплавке, резке, термообработке и других видах лазерной обработки.

Кроме того, термодиформационные процессы в значительной степени определяют эксплуатационные свойства деталей и конструкций, обработанных лазерным излучением, т. е. степень соответствия механических и химических свойств условиям и требованиям эксплуатации. И, наконец, вопросы точности деталей и конструкций после лазерной обработки основаны на знании закономерностей образования деформаций и напряжений.

При неравномерном нагреве тела связи между нагретыми и ненагретыми участками препятствуют свободному расширению тела. При лазерной обработке на стадиях нагрева, выравнивания температур и охлаждения имеют место временные напряжения.

Неравномерный нагрев и изменение объема тела вследствие температурного расширения, а также фазовых или структурных превращений приводят к возникновению упругих и пластических деформаций. Пластические деформации в теле после его полного охлаждения являются причиной действия собственных напряжений, называемых остаточными.

Реальные технологические процессы лазерной обработки проводятся при существенно более высоких температурах, и, следовательно, возникновение деформаций и напряжений происходит в условиях упругопластического деформирования.

Собственные напряжения (временные и остаточные) независимо от характера распределения в теле всегда уравновешены. В зависимости от объема взаимного уравновешивания напряжения подразделяют на напряжения первого рода, уравновешенные в макрообъемах; напряжения второго рода, уравновешенные в объемах одного или нескольких зерен; напряжения третьего рода, уравновешенные в микрообъемах, соизмеримых с размером кристаллической решетки.

Изменение формы и размеров конструкции обусловлено действием напряжений первого рода, тогда как напряжения второго и третьего рода имеют определяющее значение при анализе условий возникновения разрушения в процессе обработки.

Собственные напряжения в зависимости от направления действия подразделяют на одноосные, или линейные, действующие в теле лишь в одном направлении; двухосные, или плоскостные, действующие в плоскости; трехосные, или объемные, действующие по всем направлениям в пространстве.

В зависимости от формы и размеров обрабатываемых лазерным излучением элементов, а также характера действующего излучения могут возникать одно-, двух- или трехосные напряжения. При лазерной наплавке валика на кромку пластины, лазерной сварке или резке длинных узких полос, а также лазерной термообработке кромок элементов напряженное состояние можно считать одноосным. В случае лазерной однопроходной сварки и резки элементов небольшой толщины, наплавки и термообработки поверхностей возникает двухосное напряженное состояние. И наконец, при лазерной сварке и резке элементов большой толщины имеет место трехосное напряженное состояние, являющееся наиболее сложным для расчетного и экспериментального определения.

Соответственно напряжения, действующие в направлении лазерной обработки, называют продольными и обозначают σ_x . Напряжения, действующие в плоскости xOy перпендикулярно направлению обработки, называют поперечными и обозначают σ_y . Напряжения, действующие в направлении, перпендикулярном плоскости обработки xOy , называют напряжениями по толщине элементов и обозначают σ_z . Наряду с нормальными компонентами напряжений могут действовать соответствующие касательные напряжения τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} .

Деформации, возникающие при лазерной обработке, обозначают аналогично напряжениям. Различают нормальные ε_x , ε_y , ε_z и сдвиговые γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} компоненты деформации. Деформации определяют изменение линейных и угловых размеров тела и характеризуют состояние его отдельных участков.

Особенностью процесса образования деформаций и напряжений при лазерной обработке является изменение свойств металлов в широких пределах, обусловленное переменными температурами и характером развития деформаций.

Параметры упругости металлов, используемые при расчетах деформаций и напряжений (например, E — нормальный модуль упругости; G — модуль сдвига; K — объемный модуль; ν — коэффициент Пуассона), в малой степени зависят от условий деформирования и могут определяться экспериментами при различных температурах лазерной обработки. Указанные параметры упругости функционально связаны между собой так, что независимыми остаются только два параметра из четырех.

Зная коэффициент Пуассона ν_i и модуль сдвига G_i , можно найти значения нормального модуля E_i и объемного модуля K_i , при определенной температуре T_i :

$$E_i = 2G_i(1 + \nu_i)$$
$$K_i = \frac{2G_i(1 + \nu_i)}{1 - 2\nu_i}$$

При исследованиях процессов образования временных и остаточных деформаций и напряжений важное значение имеет вид деформационной характеристики материала, вводимой в расчет.

Термодеформационный цикл при лазерной обработке характеризует изменение температуры и напряженно-деформированного состояния точки тела. При его воспроизведении на образце можно создать такое же температурное и напряженно-деформированное состояние, какое имеет место в процессе лазерной обработки. Для этого необходимо выполнить следующие требования: 1) образец должен быть изготовлен из металла объекта, подвергаемого лазерной обработке; 2) термический цикл образца должен совпадать с термическим циклом при лазерной обработке. Характер деформирования

образца определяется компонентами деформаций, возникающими при лазерной обработке, и упругими свойствами металла.

Теоретические и экспериментальные методы определения деформаций и напряжений.

Графорасчетные методы. Наиболее просто определяются временные и остаточные деформации и напряжения в случае одноосного напряженного состояния, имеющего место при лазерной сварке или резке длинных узких полос, а также при лазерной наплавке или термообработке прямолинейных кромок элементов. Продольные деформации ϵ_s и продольные напряжения σ_x в данном случае можно легко рассчитать графорасчетным методом.

Основные положения этого метода базируются на следующих представлениях:

принимается гипотеза плоских сечений, в соответствии с которой поперечные сечения элементов в процессе обработки не искривляются;

устанавливается условие о том, что в обрабатываемых элементах возникают только продольные напряжения σ_x ;

свойства материала представляют в виде диаграммы идеального упругопластического тела с постоянным значением σ_T до температуры, равной 773 К, с последующим линейным изменением предела текучести до $\sigma_T = 0$ при температуре, равной 873 К. Остальные теплофизические и механические свойства считают постоянными.

Представленный графорасчетный метод можно использовать для анализа деформаций и напряжений не в одном, а в ряде сечений на стадии нагрева и охлаждения. При этом для каждого сечения выполняют графические построения, аналогичные рассмотренным выше с последовательным учетом накапливаемых пластических деформаций. Это позволяет более точно определять напряжения в процессе обработки. Остаточные напряжения в шве и околошовной зоне также оказываются равными пределу текучести материала. Фактически реализацию этого метода расчета можно легко осуществить в численном виде с помощью ЭВМ.

Графорасчетный метод является простым и наглядным, хорошо иллюстрирует и дает возможность вскрыть механизм образования продольных деформаций и напряжений. Метод имеет и практическое значение для определения остаточных деформаций.

В процессе лазерной обработки реальных конструктивных элементов в отличие от узких пластин, как правило, имеет место сложное напряженное состояние. В данном случае применять графорасчетный метод уже нельзя и следует переходить к методам, базирующимся на использовании теорий упругости и пластичности.

Методы с использованием теории упругости. Математический аппарат теории упругости обычно применяют для решения температурных задач, когда температура изменяется в достаточно узких пределах, а физико-механические свойства материала изменяются незначительно. Известен ряд решений на основе теории упругости применительно к нагреву различных конструкций.

Однако лазерная обработка связана с изменением температуры в широких пределах и, как следствие, с пластическими деформациями. Применение теории упругости для количественного анализа напряжений в редких случаях позволяет получить достоверные результаты. Но для расчетного определения компонентов деформации и перемещений использование теории упругости дает возможность получить достаточно точные данные. Результаты решения на основе теории упругости в компонентах напряжений и деформаций являются первым приближением, т. е. первым этапом решения упругопластической задачи, что вызывает интерес к методам решения с применением этой теории.

Методы с использованием теории пластичности. При проведении лазерной обработки металлов в зоне воздействия излучением осуществляют нагрев до высоких температур, вследствие чего в обрабатываемых участках происходят пластические деформации. Поэтому более точную количественную оценку по деформациям и

напряжениям, возникающим при лазерной обработке, можно получить решением задач с использованием теории пластичности при переменных температурах.

При решении задач теории пластичности наиболее распространен принцип, базирующийся на том, что решение пластической задачи рассматривается в виде решения последовательно уточняемых задач теории упругости с учетом некоторых дополнительных условий.

В зависимости от вида дополнительных условий различают несколько итерационных схем, в которых на каждой итерации осуществляют решение упругой задачи. В соответствии с этим наиболее широкое применение получили метод дополнительных нагрузок, метод дополнительных деформаций и метод переменных параметров упругости. Кроме этих методов, при решении упругопластических задач используют и другие, основанные на сочетании принципов упругих решений, изложенных выше.

В основу всех принципов упругих решений заложен итерационный процесс уточнения дополнительных условий. С использованием этих принципов разработаны методы решения упругопластических задач для определения деформаций и напряжений при лазерной обработке.

Временные деформации и напряжения. Для оценки временных напряжений, возникающих в процессе тепловой обработки, используют методы оптического моделирования, когда деталь изготавливают из оптически активного материала. Подобие термоупругих напряжений модели из оптически активного материала и металлического образца определяется их геометрическим подобием, а также подобием полей температур.

Более распространено определение деформаций непосредственно на объекте в процессе его тепловой обработки, особенностью которого является необходимость проведения измерений в высокотемпературных областях. Большое распространение для таких измерений находят механические деформометры с разнообразными кинематическими схемами и датчиками регистрации. В качестве измерительного устройства в таких деформометрах применяют индикаторные головки, проволочные тензометры, пневматические тензометры, а также различные электрические датчики (индуктивные, емкостные и др.).

При исследовании высокотемпературных деформаций используют методику бесконтактного измерения, основанную на фотосъемке отметок, предварительно нанесенных в зоне обработки. Для оценки кинетики деформирования кристаллизующегося металла в процессе обработки с оплавлением в расплавленный объем перед затвердеванием вводят металлические включения в виде порошка. В дальнейшем киносъемкой данного участка производят непрерывную регистрацию относительного положения отдельных включений. Расшифровка кинограммы позволяет оценить деформации на стадии остывания.

Остаточные деформации и напряжения. Наиболее распространены механические методы определения остаточных деформаций и напряжений, основанные на принципе упругой разгрузки объема металла при его освобождении от остаточных напряжений путем разрезки. При этом возникают упругие деформации; зная их значения, по формулам теории упругости вычисляют остаточные напряжения.

Существуют различные методы измерения деформаций, характеризующих остаточные напряжения. Для этих целей широко используют электрические тензометры и механические деформометры. В качестве электрических тензометров применяют проволочные или фольговые датчики сопротивления, наклеиваемые на поверхность металла. В некоторых случаях используют фотоупругие датчики из оптически активного материала. Механические деформометры имеют различные конструкции, предназначенные для измерения деформаций в различных элементах конструкций.

В последние годы для более точного измерения базовых размеров в механических методах определения остаточных напряжений применяют методы лазерной голографии. Использование этих методов, характеризующихся высокими чувствительностью и

точностью измерения, позволяет найти остаточные напряжения с высокой степенью локальности.

Большой интерес представляют физические методы определения остаточных напряжений, которые в отличие от механических не связаны с обязательным разрушением металла. Однако эти методы относительно мало изучены применительно к особенностям измерения остаточных напряжений, вызванных тепловым воздействием на металлы.

Физические методы основаны на анализе изменения свойств металла под воздействием остаточных напряжений. Но так как это изменение в зоне обработки обусловлено совокупным воздействием физико-химических процессов в материалах при лазерной обработке и возникающих остаточных напряжений, то результаты измерений физическими методами характеризуют остаточные напряжения в зоне обработки неоднозначно.

Магнитоупругий метод основан на зависимости магнитной проницаемости объема металла от величины действующих в данном объеме остаточных напряжений. Использование метода ограничено лишь металлами, обладающими магнитными свойствами.

Ультразвуковой метод определения остаточных напряжений основан на зависимости скорости распространения ультразвуковой волны в металлах от действующих в них напряжений. При его использовании сопоставляют скорости распространения ультразвука на отдельном участке металла до лазерной обработки и после нее.

Для исследования поверхностных остаточных напряжений может быть использован метод, основанный на регистрации твердости. Рентгеновский метод исследования напряжений (рентгеновская тензометрия) основан на измерении деформаций с последующим расчетом напряжений по формулам теории упругости. Рентгеновским способом фактически исследуют поверхностные напряжения. Важным преимуществом этого метода является возможность определения напряженного состояния образца без его разрушения.

Особенности распределения остаточных деформаций и напряжений.

В процессе лазерной обработки протяженного участка на стадии нагрева происходят пластические деформации укорочения, а на стадии охлаждения — пластические деформации удлинения. Так как пластические деформации на стадии нагрева по абсолютной величине превосходят пластические деформации на стадий охлаждения, то остаточные пластические деформации являются деформациями укорочения. Вследствие этого имеют место деформации укорочения всего обрабатываемого элемента в целом.

Результаты экспериментов свидетельствуют о неравномерном распределении продольных остаточных деформаций в поперечном сечении сварных пластин во всех случаях сварки. Причем максимальные значения продольных деформаций имеют место в шве. Однако уровни максимальных деформаций при аргонодуговой и лазерной сварке существенно отличаются.

Сопоставление полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что проведение процесса при высокой степени концентрации энергии при лазерной сварке дает возможность достичь устойчивого проплавления и качественного формирования шва при скоростях сварки, в несколько раз превышающих соответствующие значения при аргонодуговой сварке.

Процесс сварки в общем случае также характеризуется наличием остаточных поперечных деформаций, которые принято называть поперечной усадкой $\Delta_{\text{поп}}$ сварного соединения.

Интерес представляет сопоставление поперечной усадки при близких значениях эффективной мощности процессов лазерной и аргонодуговой сварки. Было установлено, что при практически равных значениях эффективной мощности поперечная усадка при ЛС почти в 3 раза меньше, чем при АРДС.

С этой целью используют известную из теории сварочных деформаций и напряжений формулу для расчета поперечной усадки пластин, сваренных встык за один проход:

$$\Delta_{\text{поп}} = A \frac{2\alpha}{c\gamma} \frac{q}{v_{\text{св}} \delta}$$

где A — эмпирический коэффициент, устанавливающий отношение экспериментально полученной $\Delta_{\text{поп}}$ к ее теоретически возможной максимальной величине; α — коэффициент линейного расширения.

Наиболее характерным для всех сварных соединений, выполненных различными способами сварки, является наличие остаточных напряжений. Как уже указывалось выше, термомодеформационный сварочный цикл приводит к образованию остаточных продольных пластических деформаций укорочения в шве и околошовной зоне. Вследствие этого возникают остаточные продольные напряжения.

Следует отметить, что в различных типах сварных соединений возможно образование и других составляющих остаточных напряжений. Но в большинстве случаев продольные остаточные напряжения по абсолютной величине значительно превосходят остальные составляющие напряжений, а при сварке тонколистовых конструкций толщиной до 10 мм являются основными.

При лазерном термоупрочнении поверхностных участков имеет место крайне неравномерное распределение температур как по глубине обрабатываемой детали, так и по ее поверхности. Вследствие этого распределение остаточных напряжений характеризуется высокими градиентами. Использование рентгеновского метода определения остаточных напряжений в данном случае обеспечивает высокую достоверность. Известно, что величина и знак остаточных напряжений оказывают значительное влияние на износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность и другие свойства термоупрочненного лазером поверхностного участка.

Механизм образования остаточных напряжений при локальном тепловом воздействии в процессе сварки, резки, термоупрочнения и других определяется наличием остаточных пластических деформаций укорочения в зоне обработки, вызывающих образование остаточных растягивающих напряжений в этой зоне. Однако в результате структурных и фазовых превращений металла в зоне обработки на стадии охлаждения, связанных с объемными эффектами, эта закономерность может существенно измениться.

Знание закономерностей образования остаточных напряжений и их связей с режимами лазерной обработки позволяет регулировать распределение остаточных напряжений на термоупрочненных участках в целях обеспечения высоких рабочих характеристик.

Технологическая прочность металлов при лазерной обработке.

Под технологической прочностью понимают свойство металлов сопротивляться разрушениям в процессе технологической обработки. Применительно к лазерной обработке необходимо различать следующие виды технологической прочности:

свойство наплавленного металла, металла сварного шва и околошовной зоны воспринимать термомодеформационное воздействие при высоких температурах в процессе лазерной обработки с расплавлением металла — наплавки, сварки и других процессов — без образования горячих трещин;

свойство металла, обработанного лазерным излучением, воспринимать термомодеформационное воздействие на стадии охлаждения без образования холодных трещин при фазовых и структурных превращениях в твердом состоянии.

Горячие трещины. В процессе лазерной наплавки, сварки и других видов лазерной обработки, связанных с расплавлением металла, на стадии кристаллизации наплавленного металла или металла шва возможно возникновение хрупких межкристаллитных разрушений, которые называют горячими трещинами.

Как было показано выше, в процессе наплавки и сварки на стадии охлаждения происходит интенсивное развитие упругопластических деформаций. Если высокотемпературные деформации при охлаждении расплавленного металла превосходят

его деформационную способность, то в нем возникают горячие трещины. Таким образом, для анализа возможности образования горячих трещин необходимо сопоставить деформации, возникающие в процессе сварки или наплавки, с деформационной способностью металла.

Деформации металла при лазерной обработке определяют различными теоретическими и экспериментальными методами. Наибольший интерес при проведении анализа вероятности возникновения горячих трещин представляет характер изменения высокотемпературных деформаций на стадии охлаждения расплавленного металла в процессе его кристаллизации, определяемый темпом деформации $\alpha_T = \partial \varepsilon / \partial T$.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что темп деформаций в высокотемпературной области зависит от теплофизических свойств металла, режима лазерной сварки или наплавки и жесткости обрабатываемых элементов. Во всех случаях наплавки и сварки плавлением в высокотемпературном интервале кристаллизующийся металл испытывает значительные упругопластические деформации удлинения, являющиеся причиной возникновения горячих трещин.

В соответствии с диаграммой состояния железо—углерод в сталях, как и в большинстве других сплавов, кристаллизация происходит в температурном интервале ликвидус (T_L) — солидус (T_C) (рис. 4.1). При температурах выше T_L сплав находится в жидкой фазе, а при температурах ниже T_C сплав полностью затвердевает. В интервале $T_L—T_C$ сплав находится в двухфазном твердожидком состоянии.

При кристаллизации в твердожидкой фазе происходит специфическое изменение механических свойств сплава. На начальной стадии кристаллизации имеет место большой объем жидкой фазы, при этом отдельные кристаллиты разъединены жидкими прослойками. В этом состоянии система характеризуется высокой пластичностью, определяемой свойствами жидкости (см. рис. 4.1, участок 1).

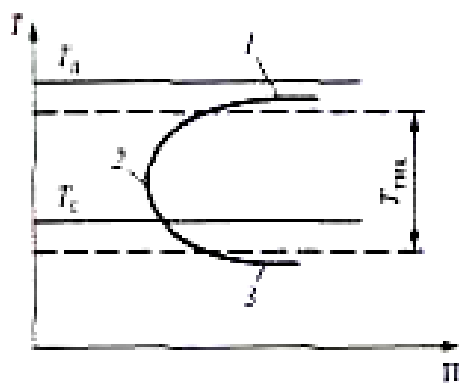


Рис. 4.1. Пластичность металла при различных температурах

При последующем снижении температуры происходят увеличение объема твердой фазы и соответствующее уменьшение объема жидкой фазы. Если при этом кристаллы образуют каркас, препятствующий циркуляции жидкости, то возникающие при лазерной обработке деформации могут приводить к хрупкому межкристаллитному разрушению вследствие того, что пластичность этой двухфазной системы резко снижается до весьма малых значений (см. рис. 4.1, участок 2). При дальнейшем уменьшении температуры кристаллы, развиваясь, образуют сплошной каркас, характеризуемый увеличением пластичности кристаллов (см. рис. 4.1, участок 3). На этой стадии охлаждения межкристаллитное разрушение переходит во внутрикристаллитное с вязким характером разрушения. Таким образом, в процессе кристаллизации металлов можно выделить интервал температур, в котором прочность и пластичность весьма малы. Это так называемый температурный интервал хрупкости (ТИХ). Именно в этом интервале температур T_{max} ,

который характеризуется уменьшением пластичности, наиболее вероятно образование разрушений при проведении процессов сварки и наплавки.

Существуют три основных показателя, определяющих возможность образования горячих трещин при сварке и наплавке: темп упругопластических деформаций при охлаждении расплавленного металла, значение ТИХ и минимальная пластичность P_{min} металла в этом интервале. С увеличением α_T и ТИХ и уменьшением P_{min} вероятность образования горячих трещин возрастает.

Методы исследования сопротивляемости сварных соединений горячим трещинам. Разработаны многочисленные методы оценки технологической прочности в процессе кристаллизации по различным косвенным критериям. Наиболее распространены испытания на разнообразных технологических пробах и испытания с помощью машинных методов.

Критерием оценки технологической прочности является наличие трещин, частота их образования и суммарная длина. Для получения наибольшей чувствительности металла шва к образованию горячих трещин в процессе сварки диаметр кругового шва и размеры пробы варьируют таким образом, чтобы при сопоставимых способах сварки ее геометрические параметры обеспечивали бы образование горячих трещин в шве. После полного охлаждения пробы при ее рассмотрении с помощью инструментального микроскопа подсчитывают суммарную длину трещин на поверхности шва, которая является критерием оценки технологической прочности при сварке.

Обычно методика испытаний сводится к сварке серии образцов при использовании заданного режима. Изменяя скорость деформирования от образца к образцу, находят критическое значение, превышение которого вызывает образование горячих трещин. Эту критическую скорость $v_{кр}$ деформирования образца можно рассматривать в качестве показателя технологической прочности, пригодного для количественного сопоставления склонности различных сплавов к образованию горячих трещин при неизменном термическом цикле сварки.

Формирование и кристаллизация шва при лазерной сварке. Характерной особенностью поверхности фронта кристаллизации при лазерной сварке является наличие выступа твердой фазы (ступеньки). Этим выступом сварочная ванна разделяется на две резко отличающиеся части: нижнюю — сильно заглубленную и узкую в поперечном направлении, и верхнюю — более широкую и выдвинутую вдоль шва. Такая форма ванны имеет место при лазерной сварке с высокими скоростями (рис. 4.2).

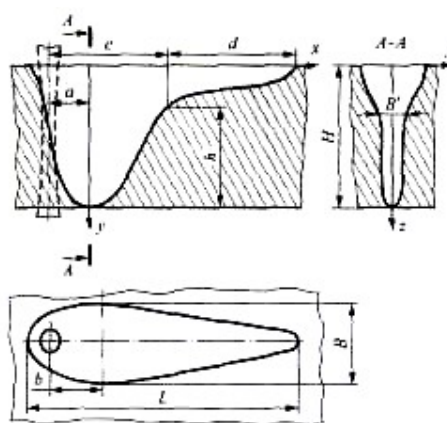


Рис. 4.2. Форма сварочной ванны при лазерной сварке

Сложная форма ванны при лазерной сварке определяется спецификой процессов плавления. Головная часть сварочной ванны находится под непосредственным воздействием концентрированного лазерного излучения с высокой плотностью мощности. В этой части ванны обеспечивается быстрый нагрев металла до температуры кипения и активное испарение, оказывающее давлением расплавленный металл. В результате этого возникает

эффект глубокого проплавления, обычно связанный с образованием парогазового канала при лазерной сварке. В хвостовой части ванны плавление металла обусловлено процессами теплопереноса вследствие массообмена и теплопроводности.

В зависимости от мощности излучения, скорости сварки, условий фокусировки и других параметров режима сварки, а также от теплофизических свойств материала осуществляется преимущественное развитие того или иного процесса нагрева. В соответствии с этим происходит изменение формы проплавления свариваемого металла. Наибольший интерес представляет, как было отмечено выше, ступенчатая конфигурация ванны при лазерной сварке, возникающая при определенном сочетании параметров режима сварки. Среди различных параметров режима сварки решающее влияние на конфигурацию ванны оказывает скорость сварки.

Для оценки степени развития процесса формирования ступеньки удобно пользоваться отношением высоты ступеньки h к общей глубине проплавления H . Чем больше это отношение, тем сильнее выражен ступенчатый характер формирования шва.

Рассмотренные особенности конфигурации ванны при лазерной сварке определяют ту или иную форму шва. Шов в поперечном сечении имеет сложную форму с узкой зоной «кинжального» проплавления в нижней части и с расширенной чашеобразной верхней частью (рис. 4.3). При этом высота зоны «кинжального» проплавления соответствует высоте выступа на межфазной поверхности.

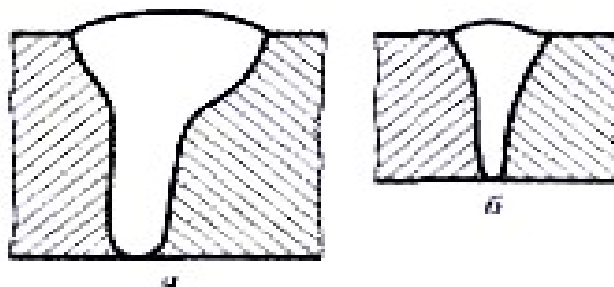


Рис. 4.3. Форма шва в поперечном сечении при лазерной сварке стали:
а- $v_{св} = 16,5$ мм/с; б- $v_{св} = 27,5$ мм/с.

При исследовании структуры металла шва в продольном сечении «кинжального» проплавления был установлен прерывистый характер формирования и кристаллизации металла шва, обусловленный периодическим переносом перегретого жидкого металла из головной части ванны в зону кристаллизации (рис. 4.4). В моменты перемещения перегретого жидкого металла происходит подплавление основного металла.

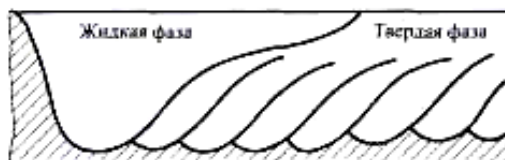


Рис. 4.4. Форма шва в продольном сечении при лазерной сварке

Вследствие периодичности переноса перегретого жидкого металла из головной части ванны в хвостовую кристаллизация шва приобретает прерывистый характер. Образование при этом слоистой структуры приводит к повышению деформационной способности металла шва. Таким образом, прерывистый характер формирования и кристаллизации зоны

«кинжального» проплавления при лазерной сварке является одной из причин высокой сопротивляемости образованию горячих трещин металла шва этой зоны.

Высокая скорость кристаллизации нижней части шва обусловлена малым объемом жидкого металла в этой зоне и повышенным теплоотводом в основной металл. В результате большой разницы скоростей процесс кристаллизации сварочной ванны по высоте происходит неравномерно. Нижняя часть сварочной ванны кристаллизуется быстрее, чем верхняя. Вследствие этого на межфазной поверхности фронта кристаллизации образуется ступенька твердой фазы. При этом создаются такие условия, когда кристаллизация нижней части шва происходит под слоем жидкого металла верхней части сварочной ванны. Последовательная кристаллизация сварочной ванны обеспечивает возможность подпитки кристаллизуемого металла жидким расплавом, что приводит к значительному повышению сопротивляемости шва образованию горячих трещин.

При больших скоростях лазерной сварки (более 11 мм/с) фронт кристаллизации характеризуется образованием ступеньки, разделяющей сварочную ванну на нижнюю узкую зону «кинжального» проплавления и верхнюю широкую зону, вытянутую вдоль шва. Ступенчатый характер формирования шва при «кинжальном» проплавлении существенно повышает его сопротивляемость образованию горячих трещин вследствие подпитки кристаллизуемого металла жидким расплавом верхней части шва. Кроме того, повышению сопротивляемости горячим трещинам зоны «кинжального» проплавления при лазерной сварке способствуют образование области равноосных кристаллов в центральной части зоны «кинжального» проплавления с высокой степенью дисперсности структуры и прерывистый характер кристаллизации.

Холодные трещины. В сварных соединениях и наплавленном металле на стадии охлаждения в области температур ниже 473 К, а также в течение нескольких суток после завершения процесса сварки могут образоваться трещины, которые называют холодными.

Холодные трещины по своей природе имеют характер замедленного разрушения, которое наблюдается при длительном воздействии постоянной или мало изменяющейся нагрузки. При этом сопротивляемость разрушению оказывается значительно ниже кратковременной прочности. Это связано с тем, что при длительном воздействии напряжений происходят упругопластические деформации сдвига зерен относительно друг друга по границам. Вследствие значительной неупорядоченности строения металла, высокой концентрации искажений кристаллической решетки и других дефектов границ зерен имеют пониженную сопротивляемость сдвигу по сравнению с сопротивляемостью зерна.

Анализ многочисленных исследований показывает, что чаще всего холодные трещины возникают в результате действия двух факторов: фазовых и структурных превращений с образованием мартенсита, т. е. в результате полной или частичной закалки, а также под влиянием водорода.

В реальных случаях лазерной обработки металлов образование холодных трещин часто связано с одновременным действием обоих факторов.

С увеличением скоростей нагрева и охлаждения в зоне лазерного воздействия время пребывания металла при высоких температурах значительно уменьшается. Это является причиной существенного измельчения первичной структуры и изменения характера кристаллизации, в результате чего металл шва или наплавленный металл становится более однородным по структуре. Измельчение первичной структуры способствует уменьшению как степени химической неоднородности, так и концентрации вредных примесей по границам кристаллов. Кроме того, значительное сокращение времени пребывания металла при высоких температурах в зоне лазерной обработки приводит к снижению вероятности попадания водорода из окружающей среды. Указанные факторы обуславливают повышение сопротивляемости образованию холодных трещин. С другой стороны, с увеличением скорости охлаждения при лазерной обработке вероятность образования закалочных структур и вследствие этого — холодных трещин возрастает.

Методы оценки сопротивляемости образованию холодных трещин. В настоящее время находят применение различные методы оценки сопротивляемости образованию холодных трещин. Наиболее распространенным методом является применение сварочных и наплавочных технологических проб лабораторного и отраслевого назначения.

Для лабораторных проб применяют простые образцы определенной формы и небольших размеров. Пробы подбирают таким образом, чтобы при сварке или наплавке материалов с низкой сопротивляемостью образованию трещин в образце возникали трещины. Тогда проба может быть использована для сравнительной оценки свойств основного металла, свариваемых или наплавляемых материалов, технологии сварки или наплавки по признаку отсутствия в образце холодных трещин. Иными словами, такие пробы являются качественным критерием оценки сопротивляемости образованию холодных трещин.

Тема 5. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАКАЛКА СПЛАВОВ.

План:

1. Классификация методов поверхностной лазерной обработки.
2. Особенности фазовых переходов при лазерном нагреве железоуглеродистых сталей.
3. Особенности образования структур в сталях при лазерном нагреве.
4. Особенности структуры, образовавшейся при большой скорости охлаждения.
5. Особенности формирования структуры сплавов при лазерной обработке с оплавлением поверхности.
6. Структура и строение поверхностных слоев сталей и чугунов после лазерной обработки.
7. Структура и механизмы упрочнения цветных металлов и сплавов.
8. Основные параметры импульсной закалки и характеристики упрочненной поверхности.
9. Основные параметры лазерной закалки непрерывными лазерами и характеристики упрочненной поверхности.
10. Факторы, влияющие на геометрические размеры зон лазерного воздействия.
11. Лазерный отжиг.
12. Лазерный отпуск.

Классификация методов поверхностной лазерной 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 (рис. 5.1).



Рис. 5.1. 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 p-n-переходов в полупроводниковых материалах.

Особенности фазовых переходов при лазерном нагреве железоуглеродистых сплавов

При лазерной закалке без оплавления стадия нагрева является очень важной, так как в процессе последующего скоростного охлаждения фиксируются структуры, формирующиеся на стадии превращений при нагреве. В ходе нагрева сплавов железа в точке A_{c1} начинается превращение перлита в аустенит. Наиболее вероятным местом зарождения аустенита в

перлитной стали является граница между ферритом Φ и цементитом Ψ . После образования зародыша аустенита феррит превращается в аустенит A , что в условиях медленного нагрева происходит в результате диффузионной перестройки кристаллической объемно-центрированной кубической (ОЦК) решетки в гранецентрированную кубическую (ГЦК), т. е. имеет место полиморфное превращение, и граница аустенит — феррит смещается к центру ферритной фазы (рис. 5.2). Одновременно с этим происходит растворение цементита и граница аустенит — цементит смещается к центру цементитной фазы.

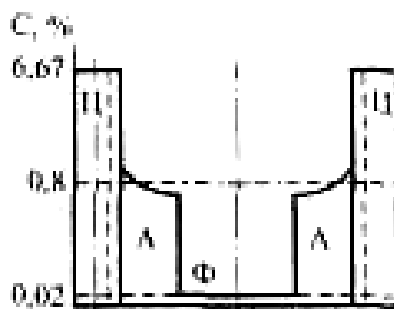


Рис. 5.2. Схема образования аустенита в перлитной стали

Процесс перестройки решеток сопровождается концентрационным перераспределением углерода вследствие его диффузии в аустените от границы с цементитом к границе с ферритом. После соприкосновения кристаллов аустенита друг с другом, растущих навстречу от двух цементитных пластин, их рост прекращается; далее происходит выравнивание концентрации углерода в аустените, т. е. гомогенизация. В случае медленного нагрева превращение перлита в аустенит осуществляется при постоянной температуре, поскольку на перестройку кристаллической решетки затрачивается вся подводимая теплота; на кривой нагрева температура A_{c1} выражена в виде горизонтальной площадки (рис. 5.3). Кинетика формирования аустенита в этом случае может быть описана уравнением Колмогорова:

$$V(t) = V_0 \left[1 - \exp \left(- \int_0^t G(\tau) \varphi(\tau) d\tau \right) \right] \quad (5.1)$$

где $V(t)$ — объем аустенита в момент времени t ; V_0 — исходный объем аустенита; $G(\tau)$ — скорость роста зародышей аустенита; $\varphi(\tau)$ — объем занятый зародышем аустенита в момент τ .

При высокоскоростном лазерном нагреве образование аустенита происходит иначе. Подводимая тепловая энергия превосходит энергию, необходимую для перестройки кристаллической решетки; при этом перестройка осуществляется с некоторой конечной скоростью. Это приводит к тому, что превращение протекает не изотермически, а в определенном интервале температур — от $A_{c1}^{\text{нач}}$ до $A_{c1}^{\text{кон}}$ (см. рис. 5.3).

В этом случае имеет место сдвиг критической точки A_{c1} в область высоких температур и температура конца аустенитного превращения смещается на величину ΔT_K . Сдвиг критических точек в зависимости от скорости нагрева, исходной структуры и химического состава стали обычно находится в интервале 50.. 200 °С. Аналитическая зависимость для расчета этого сдвига была получена Ю.Я. Мешковым с использованием уравнения Колмогорова (5.1):

$$\Delta T_K = \left(\frac{3K^2 x^2}{4D} \right)^{1/3} \omega_H^{1/3} \quad (5.2)$$

где K — параметр диаграммы состояния; x — половина расстояния между соседними центрами кристаллизации аустенита, характеризующая структурный фактор; D —

коэффициент диффузии углерода в аустените; ω_H — скорость нагрева.

На значение ΔT_K также оказывает влияние состояние исходной структуры и форма цементита в перлите.

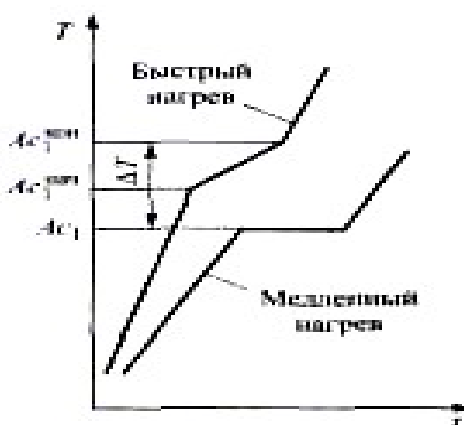


Рис. 5.3. Схема сдвига критической точки A_{c1} при высоких скоростях нагрева

На самостоятельное изучение:

1. Образование аустенита в эвтектоидной стали при лазерном нагреве
2. Образование аустенита в доэвтектоидной стали при лазерном нагреве
3. Образование аустенита в заэвтектоидной стали при лазерном нагреве

Особенности образования структур в сталях при лазерном нагреве

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 (рис.5.4) 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 (см. рис. 5.4, а). 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 субмикроннеоднородность, поскольку межпластинчатое расстояние в перлитной стали составляет 0,25...0,6 мкм, и из-за

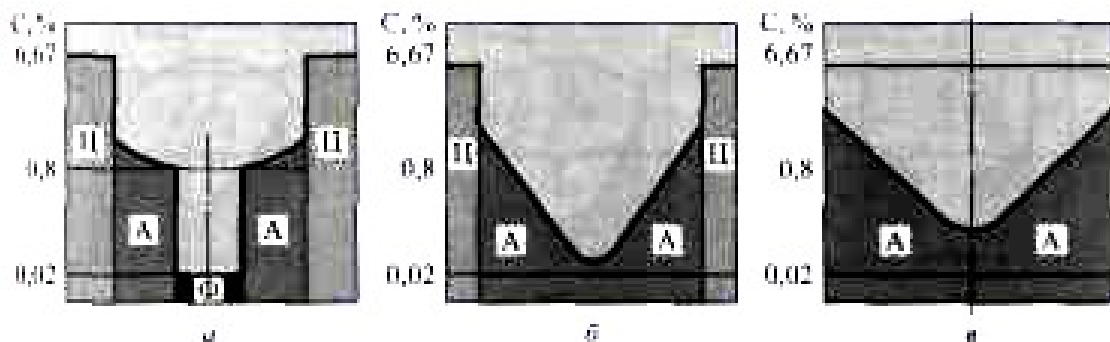


Рис. 5.4. Неоднородности структуры в эвтектоидной стали

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 (рис. 5.5). 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 (см. рис. 5.5, а). Возможен случай, когда в пределах бывшего зерна перлита превращение $\Phi \rightarrow A$, завершено, а превращение избыточного феррита не закончено (см. рис. 5.5, б). При завершении превращения $\Phi \rightarrow A$, когда растворения цементита не происходит (случай изменения последовательности структурных превращений), в сталях имеются две фазы — цементит и аустенит (см. рис. 5.5, в). После полного растворения цементита между бывшими ферритными и перлитными участками имеется неравномерность по углероду (см. рис. 5.5, г).

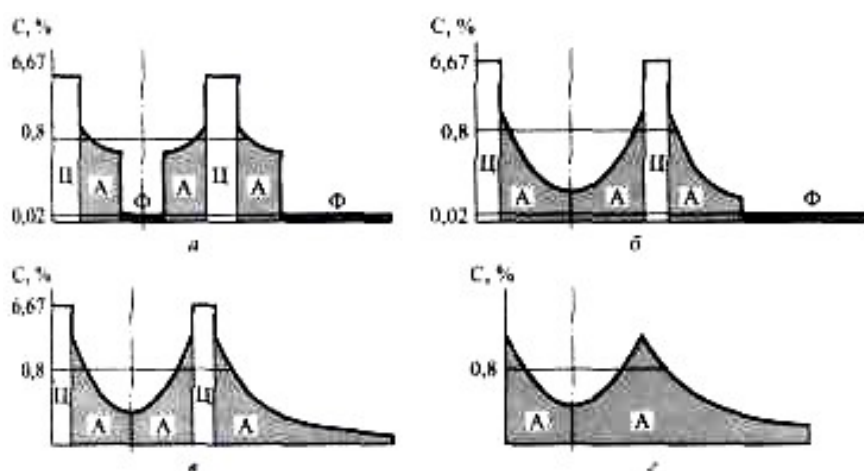


Рис. 5.5. Неоднородности структуры в доэвтектоидной стали

В *заэвтектоидной стали*, в которой присутствуют три фазы: цементит, аустенит и феррит, при незавершении превращения $\Phi \rightarrow A$ имеет место наибольшая неоднородность (рис. 5.6, а). До растворения перлитного цементита (рис. 5.6, б) 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 (рис. 5.6, в).

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 и на рис. 5.4 - 5.6 на месте феррита можно указать аустенит. При этом схема распределения содержания углерода по участкам

принципиально не изменяется.

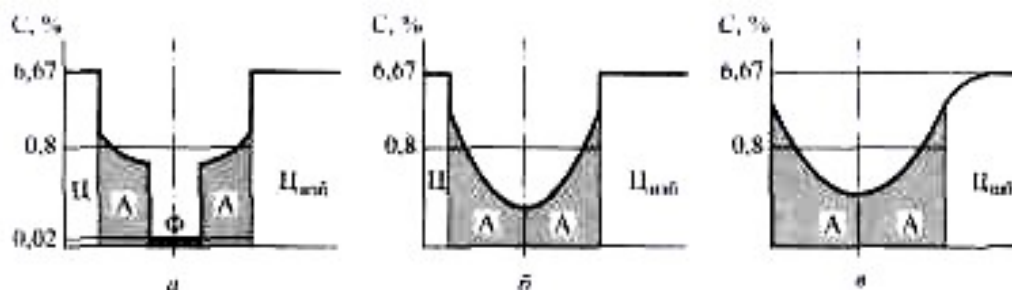


Рис. 5.6. Неоднородности структуры в заэвтектоидной стали

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.

Лазерная обработка отличается малым временем термического воздействия, вследствие чего перемещения границ зерен на большое расстояние и их укрупнение, как при обычном нагреве, произойти не успевают. Однако, так как процесс лазерной обработки в целях обеспечения достаточной глубины слоя проводят с нагревом до максимально возможной температуры, вплоть до температуры плавления, получить сверхмелкое зерно аустенита при этом не удается.

Следует отметить, что при формировании аустенита в процессе лазерного нагрева образуются большое количество дефектов, что приводит к его упрочнению.

Особенности структуры, образовавшейся при большой скорости охлаждения

Для получения мартенсита в сплавах железа в интервале минимальной устойчивости аустенита (400...600 °С) скорость охлаждения должна быть больше критической, которая для большинства сплавов железа находится в интервале 50...200 К/с. Многократное увеличение скорости охлаждения не приводит к формированию новых фаз и структур — при лазерном термоупрочнении в стали имеются те же фазы и структуры, что и при обычной закалке: мартенсит, цементит (карбиды) и остаточный аустенит.

Можно предположить, что при охлаждении с определенных температурных интервалов образуются следующие структуры: выше $T_{\text{ГОМ}}$ — однородный мартенсит и остаточный аустенит; в интервалах температур $T_c \dots T_{\text{л}}$, $A_{c3} \dots T_{\text{ГОМ}}$ и $A_{c_m} \dots T_{\text{ГОМ}}$ — неоднородный мартенсит и остаточный аустенит; $A_{c_1^{\text{КОН}}} \dots A_{c_3}$, $A_{c_1^{\text{КОН}}} \dots A_{c_m}$ — однородный мартенсит и избыточные фазы (феррит или цементит); $A_{c_1^{\text{НАЧ}}} \dots A_{c_1^{\text{КОН}}}$ — неоднородный мартенсит, остаточный аустенит, феррит, цементит и избыточные фазы; ниже $A_{c_1^{\text{НАЧ}}}$ — рекристаллизованные структуры или структуры отпуска. Кроме того, при небольшом нагреве выше температуры T_c из-за высокой концентрации углерода в первых порциях расплава после охлаждения возможно образование ледебурита. При локальном подплавлении избыточных карбидов по эвтектической реакции вследствие повышения концентрации углерода выше 4,3 % в микрообъемах могут образоваться карбиды.

При высокой скорости охлаждения структура после охлаждения отличается большой неоднородностью, что связано с негомогенностью аустенита. Неоднородность в перлите (см. рис. 5.5, а) после охлаждения может привести к снижению твердости стали. В случае неоднородности (см. рис. 5.5, б) рядом с мартенситом сохраняются цементитные пластины. Увеличение концентрации углерода около этих пластин приводит к образованию в этих местах остаточного аустенита. Неоднородность, показанная на рис. 5.7, в, также может вызвать формирование локальных включений остаточного аустенита.



Рис. 5.7. Диаграммы распада неомогенного аустенита в доэвтектоидной стали:
А-аустенит, П-перлит, Ф-феррит, Т-троостит

В целом мартенсит наследует неоднородность структуры. Кроме того, в результате неоднородности, изображенной на рис. 5.5, а, б и рис. 5.6, а, б, после охлаждения избыточные фазы исходной структуры (феррит в доэвтектоидной стали и цементит (карбиды) в заэвтектоидной стали) сохраняются.

При большой неомогенности аустенита в доэвтектоидной стали устойчивость аустенитных участков с различным содержанием углерода при охлаждении неодинакова. Минимальной устойчивостью обладает аустенит с малым содержанием углерода.

В общем случае при большой скорости охлаждения имеет место повышение дефектности структур, так как процессы отжига и рекристаллизации замедляются и более полно наследуются дефекты γ -фазы. При этом происходят измельчение блоков, увеличение плотности дислокаций и рост напряжений в кристаллической решетке.

Необходимо отметить, что эти изменения могут наблюдаться не только в сплавах железа с мартенситным превращением, но и в цветных сплавах вследствие больших градиентов температуры.

Особенности формирования структуры сплавов при лазерной термообработке с оплавлением поверхности

При лазерной термообработке с оплавлением поверхности конечная структура формируется на стадии охлаждения расплавленного металла. При этом наибольший интерес представляет возможность достижения высоких и сверхвысоких скоростей охлаждения расплавленного металла, так как здесь имеет место закалка из жидкой фазы.

Скорость охлаждения оказывает большое влияние на строение, структуру и свойства затвердевшего сплава. Прежде всего при большой скорости охлаждения размер зерен уменьшается, хотя однозначную связь в данном случае установить трудно. Это обусловлено тем, что оба основных параметра кристаллизации (скорость роста кристаллов S и число образовавшихся зародышей n) имеют сложную зависимость от переохлаждения ΔT , т. е. от разности между температурой равновесного ликвидуса и действительной температурой кристаллизации.

При увеличении скорости охлаждения переохлаждение значительно повышается. Так, в сплавах алюминия возрастание скорости охлаждения от 10^4 до 10^6 К/с приводит к увеличению переохлаждения ΔT от 100 до 300...350 К. При таких значениях ΔT_1 , как правило, зависимость S от ΔT имеет максимум или уменьшается, тогда как зависимость n от ΔT при тех же значениях ΔT начинает возрастать. В результате этого увеличение скорости охлаждения до указанного выше интервала может привести к росту размера зерна, а в указанном интервале вследствие интенсивного возрастания количества зародышей — к уменьшению размера зерна. В целом размер зерна связан с параметрами кристаллизации

следующим соотношением:

$$d_3 = 1,1(C/n)^{3/4}$$

Таким образом, трудность установления надежных закономерностей между размером зерна и скоростью охлаждения объясняется различным характером зависимости параметров кристаллизации от переохлаждения. К тому же в большинстве случаев определить границы зерен достаточно сложно, легче выявить внутреннее строение зерен.

Форма зерна и его внутреннее строение могут изменяться в зависимости от скорости охлаждения. При медленном охлаждении, когда число зародышей небольшое и скорость роста кристаллов невелика, зародыши образуются по всему объему расплава, направление их роста не ориентировано; при этом также образуются крупные зерна с плоскими границами и ячеистые зерна. В основном зерна состоят из одного или нескольких однонаправленных дендритов, хотя возможен и недендритный рост. Увеличение скорости охлаждения приводит к тому, что наибольшее переохлаждение достигается на границе с подложкой, а у поверхности расплава переохлаждение меньше. Поэтому ячеистые равноосные зерна имеются лишь у поверхности; возле границы с подложкой, где параметры C и n имеют наибольшие значения, столбчатые зерна растут от подложки к поверхности расплава, причем зерна состоят из нескольких одинаково ориентированных дендритов.

Измельчение зерен на свойствах сплава сказывается благоприятно. Прежде всего это выражается в том, что возможно достижение оптимального сочетания прочности и пластичности используемого материала. Поскольку при повышенных температурах границы зерен эффективно препятствуют пластическому течению металла, особенно сильное влияние измельчение зерен оказывает на увеличение сопротивления ползучести.

Кроме размера, формы и внутреннего строения зерен скорость охлаждения оказывает заметное влияние на однородность химического состава кристаллизующегося объема сплава. Вначале, когда скорость охлаждения невелика, различные участки зерен имеют одинаковый состав, который соответствует исходному составу сплава, так как в интервале кристаллизации успевает произойти диффузионное перераспределение элементов как в жидкой, так и в твердой фазе. При увеличении скорости охлаждения диффузионное перераспределение элементов в твердой фазе произойти не успевает. Поэтому участки зерен, затвердевшие в начале кристаллизации (центральные оси дендритов), обогащены тугоплавкими элементами, а участки зерен, затвердевшие в конце кристаллизации, — легкоплавкими элементами. Возникает так называемая дендритная ликвация, или микроликвация. Сначала с увеличением скорости охлаждения степень дендритной ликвации возрастает, а затем, по мере уменьшения разветвленности дендритов, в широком интервале скоростей охлаждения (ориентировочно $10^3 \dots 10^6$ К/с) остается практически постоянной. При скоростях охлаждения более 10^6 К/с перераспределение элементов не успевает произойти даже в жидкой фазе и степень дендритной ликвации резко снижается.

На самостоятельное изучение:

1. Формирование эвтектики
2. Особенности образования твёрдых растворов
3. Образование метастабильных промежуточных фаз

Структура и строение поверхностных слоев сталей и чугунов после лазерной обработки

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 теплоотовода. 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.

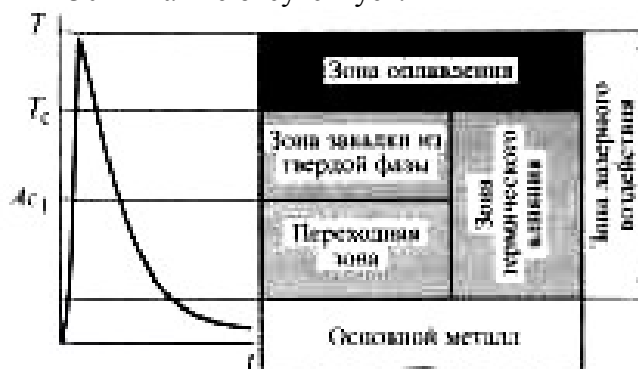


Рис. 5.8. Строение зоны лазерного воздействия после лазерной закалки

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 негомогенного 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 слоев после лазерной обработки импульсными и непрерывными лазерами нет, имеются лишь отдельные особенности, обусловленные разным временем воздействия.

Доэвтектоидные углеродистые стали.

1. Особенности формирования микроструктуры в ЗТВ 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 γ -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 α - и γ -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 околосolidусных 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.

Общий вид ЗЛВ нормализованной стали 45 представлен на рис. 5.9.

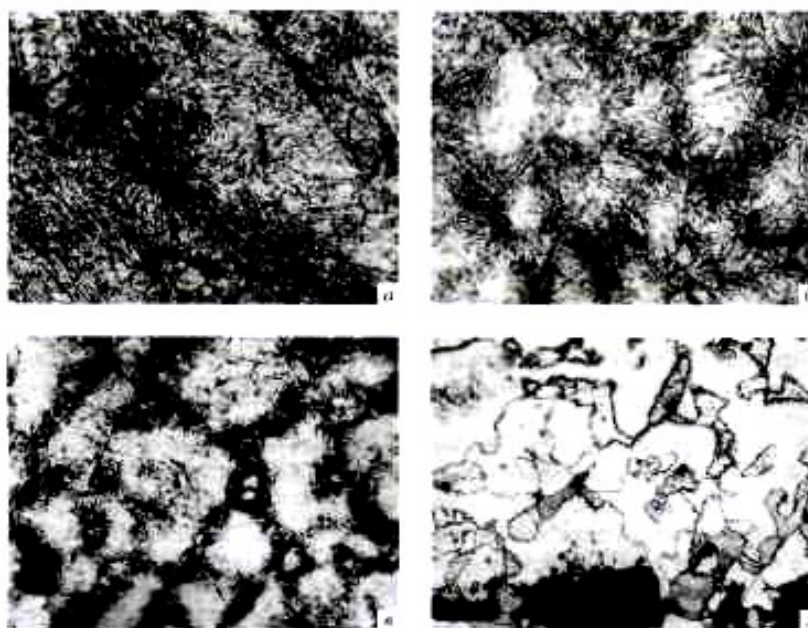


Рис. 5.9. Микроструктура различных слоев ЗЛВ нормализованной стали 45: а- зона оплавления, б – верхняя часть ЗТВ, в- середина ЗТВ, г – нижняя часть ЗТВ.

При режимах с высокими скоростями охлаждения в зоне оплавления и в верхней части ЗТВ нормализованной стали 45 образуется мелкодисперсный мартенсит с рельефными границами между пластинами (рис. 5.9, а и б). Очевидно, это речный мартенсит, возможно, с некоторым количеством бейнита. Микротвердость зоны оплавления колеблется в пределах от 7000 до 8500 МПа, причем более высокие ее значения наблюдаются в нижней части зоны, что можно объяснить большей скоростью охлаждения. По мере увеличения глубины ЗТВ неоднородность структуры повышается: вначале образуется мартенситотроостит (см. рис. 5.9, б), а затем — мартенсит и трооститная сетка, которая переходит в трооститоферритную (рис. 5.9, в) и на границе с исходной структурой — в ферритную (рис. 5.9, г).

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 речный 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 бен-нит. 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 ЗТВ 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 ЗТВ 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 ЗТВ. ЗТВ 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, исключающих 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 нерас-творенные 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.

Чугуны. Как и при лазерном упрочнении сталей, в чугунах можно выделить зону оплавления и зону закалки из твердой фазы. Третий слой — переходная зона, или зона отпуска, — в чугунах выявляется редко; в этом случае зона термического влияния состоит лишь из зоны закалки из твердой фазы.

При обработке с оплавлением графит растворяется в расплаве, и после охлаждения в зоне оплавления формируется структура белого чугуна, т. е. затвердевание происходит по метастабильной диаграмме железо — углерод без выделения свободного графита. При высокой скорости охлаждения общая закономерность кристаллизации белых чугунов может изменяться.

В доэвтектическом чугуне кристаллизация начинается с выделения первичных зерен аустенита, затем при температуре 1147 °С происходит образование эвтектики — ледебурита. Как видно на рис. 5.10. а, в структуре зоны оплавления трудно выделить избыточные кристаллы аустенита; в ней содержится мелкодисперсная смесь аустенита и цементита, имеющая дендритное строение. Очевидно, из-за высокой скорости охлаждения кристаллизация избыточного аустенита подавляется и весь расплав затвердевает квазиэвтектически с образованием квазиледебурита.

Зона закалки из твердой фазы отличается очень неоднородной структурой. Ниже линии оплавления находится светлая полоса шириной 10...20 мкм, что свидетельствует о том, что здесь имело место значительное насыщение матрицы углеродом из графитных включений. Из-за эффекта «контактного плавления» граница между зоной оплавления и ЗТВ в чугунах очень неровная. Эффект заключается в том, что металлическая, или ферритная, матрица около графитных включений насыщается углеродом, в результате чего температура ее плавления снижается. По этой же причине в верхней части ЗТВ матрица вокруг графита оплавляется и насыщается углеродом. Степень насыщения на различном расстоянии от графита различна, поэтому по мере удаления от графитных включений наблюдается гамма структур (рис. 5.10, в). Около графита образуется светлый слой ледебурита, далее — слой

аустенита, и, наконец, — аустенитно-мартенситная игольчатая структура. При малых размерах пластин графит может полностью раствориться и ледебуритная структура может отсутствовать.

В средней и нижней частях ЗТВ насыщение углеродом до аустенитной и аустенитно-мартенситной структуры может происходить и без оплавления (рис. 5.10, *з*). Микротвердость этих участков также различна: с аустенитной и аустенитно-мартенситной структурой — 6400...6770 МПа, а с цементитной и ледебуритной структурой — 10000...12000 МПа. Образование цементитных прослоек может быть причиной охрупчивания.

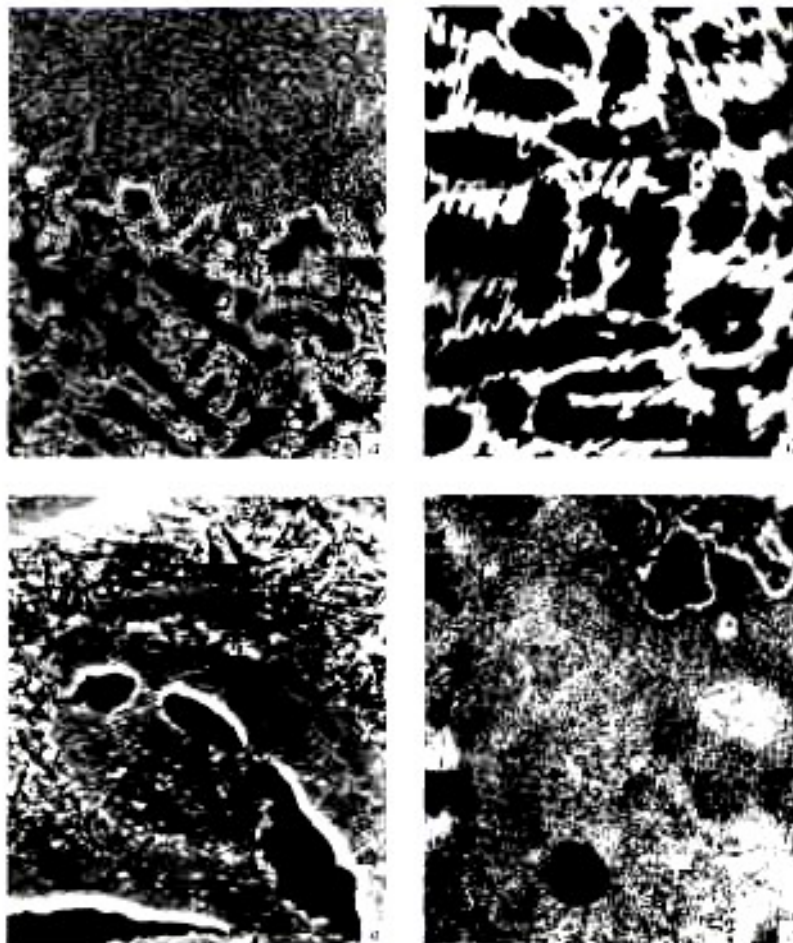


Рис. 5.10. Микроструктура ЗЛВ серых чугунов:
а - зона оплавления и ЗТВ серого спецчугуна, б - зона оплавления, в - верхняя часть ЗТВ, г - нижняя часть ЗТВ чугуна

Увеличение скорости обработки приводит к уменьшению степени насыщения углеродом матрицы вокруг графитных включений в верхней части ЗТВ. В нижней части ЗТВ незавершенность аустенитизации при нагреве возрастает и твердый раствор насыщается углеродом в меньшей степени. В результате этого при увеличении скорости средние значения твердости заметно снижаются.

Осуществлять упрочнение чугунов с оплавлением при высокой плотности мощности и скорости обработки не рекомендуется. Кроме того, импульсная закалка с оплавлением может приводить к образованию зоны оплавления капельного вида.

Упрочнять чугуны следует при невысокой плотности мощности и небольшой скорости обработки.

Структура и механизмы упрочнения цветных металлов и сплавов

Алюминиевые сплавы. 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.

1. *Чистый алюминий и однофазные сплавы.* Упрочнение таких сплавов возможно путем измельчения зерна и увеличения дефектности кристаллического строения.

2. *Деформируемые сплавы, упрочняемые термообработкой.* 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.

Медные сплавы. 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 и 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.

Титановые сплавы. 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 β -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 α' и α'' , что обычно может произойти в двухфазных ($\alpha+\beta$)-сплавах при закалке. Это всегда приводит к повышению твердости, причем α' -фаза значительно тверже, чем α'' . С возрастанием легирующих элементов в титановых сплавах количество α'' -фазы увеличивается, что сопровождается некоторым уменьшением микротвердости.

Основные параметры импульсной лазерной закалки и характеристики

упрочненной поверхности

К основным параметрам импульсной лазерной закалки относятся энергия в импульсе W , Дж, диаметр лазерного пятна d_n , мм, и длительность импульса τ_i , мс. Иногда в качестве энергетических характеристик лазеров используют такие всячины, как мощность в импульсе

$$P_{II} = W_{II} / \tau_i$$

и среднюю мощность лазера

$$P_{cp} = P_{II} \tau_i f_i = W_{II} f_i$$

где f_i — частота следования импульсов, Гц.

При условии, что энергия по пятну распределена равномерно, параметры можно объединить:

$$E = W_{II} / S_{II} \tau_i = P_{II} / S_{II}$$

где S_n — площадь лазерного пятна, см; E — плотность мощности, Вт/см².

При импульсной закалке используют плотность мощности падающего излучения. Для определения поглощенной плотности мощности q необходимо учитывать коэффициент поглощения A , тогда $q = AE$.

Обработку, как правило, проводят в расходящемся пучке, так как это позволяет обеспечить оптимальные показатели качества термоупрочнения (рис. 5.11).

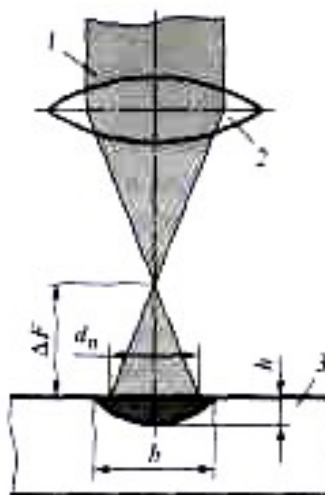


Рис. 5.11. Схемам импульсной закалки:
1 – луч лазера, 2 – линза, 3 – деталь.

При этом необходимый диаметр пятна подбирают изменением расфокусировки ΔF . Для увеличения равномерности распределения энергии по пятну необходимо использовать максимальную энергию накачки, которая регулируется напряжением накачки установки. Плотность мощности излучения изменяют путем изменения d_n и W , при этом следует учитывать, что при изменении W может изменяться и длительность импульса τ_i . Упрочненная одним импульсом зона лазерного воздействия в поперечном сечении имеет вид сегмента глубиной h и шириной b . Обычно ширина зоны не равна диаметру пятна d_n .

К характеристикам упрочненной области относятся геометрические размеры ЗЛВ, микротвердость и шероховатость поверхности. При наложении единичного пятна геометрические размеры ЗЛВ выражаются ее глубиной h и шириной b . Характер лазерной закалки определяют две величины: пороговая и критическая плотность мощности. При обработке поверхности излучением с плотностью мощности выше пороговой интенсивное

развитие получают процессы испарения, происходят разрушение поверхности и образование кратера. Так как часть энергии расходуется на испарение, ширина зоны упрочнения при этом уменьшается.

Все виды импульсной термообработки проводят при плотности мощности E_n ниже пороговой. Критическая плотность мощности $E_{кр}$ — это значение плотности, выше которого происходит оплавление поверхности. Процесс лазерной закалки без оплавления стремятся проводить таким образом, чтобы нагреть поверхность металла до наивысшей температуры для получения максимальной глубины ЗЛВ, не допустив оплавления. Для этого необходимо работать в условиях режимов, близких к $E_{кр}$. Такие режимы принято называть оптимальными. Глубина упрочненной зоны на сталях при этом, как правило, не превышает 0,1 ... 0,15 мм.

При обработке в интервале от $E_{кр}$ до E_n глубина упрочнения для различных сталей обычно составляет 0,15...1,0 мм. Энергия в импульсе современных лазерных установок обычно изменяется от нескольких джоулей до нескольких сот джоулей, длительность импульса — от 0,1 до 10 мс, а диаметр пятна — от 2 до 10 мм. Изменение характеристик упрочненной поверхности принято рассматривать при изменении только одного из основных параметров лазерной закалки и при постоянстве остальных. Повышение энергии и длительности импульса приводит к увеличению глубины и ширины ЗЛВ. С увеличением диаметра пятна d_n при постоянных значениях W и τ_i , глубина уменьшается, а ширина увеличивается до некоторого предела.

Микротвердость в зонах лазерного воздействия различных материалов зависит от соотношения E и $E_{кр}$. Влияние на нее параметров d_n , W и τ_i также может быть значительным в зависимости от типа сплава и его исходной структуры.

Особенности лазерной закалки в защитных средах. Обработку с использованием защитных газов проводят по схемам, приведенным на рис. 5.12. Схема с применением сопла (рис. 5.12, а) удобна при визуальном контроле за процессом упрочнения. Использование схемы, изображенной на рис. 5.12, б, позволяет уменьшить возможность попадания воздуха в зону обработки и несколько сократить расход защитного газа. Применение схемы, представленной на рис. 5.12, в, целесообразно в том случае, когда необходимо уменьшить динамическое воздействие газовой струи на зону обработки.

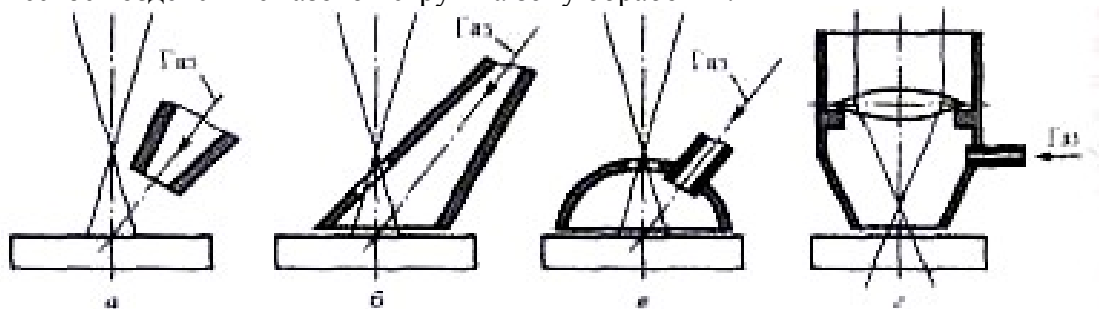


Рис. 5.12. Схемы импульсной лазерной закалки с использованием защитных газов

Из-за возможности загрязнения линзы продуктами взаимодействия лазерного излучения с материалом обрабатываемой детали схему, приведенную на рис. 5.12, г, применяют редко. Расход газа при использовании этих схем составляет 4...10 л/мин, один баллон сжатого газа обычно расходуется за 2-3 рабочих дня. Для сокращения расхода защитных газов в 2-3 раза применяют специальные дозаторы, синхронизирующие подачу газа с воздействием лазерного импульса.

Для использования в качестве защиты вакуума или контролируемых атмосфер требуется применение вакуумных камер (рис. 5.13). Основная трудность при использовании таких камер состоит в возможности быстрого разрушения окон для ввода лазерного излучения из-за осаждения копоти и продуктов испарения с обрабатываемой детали.

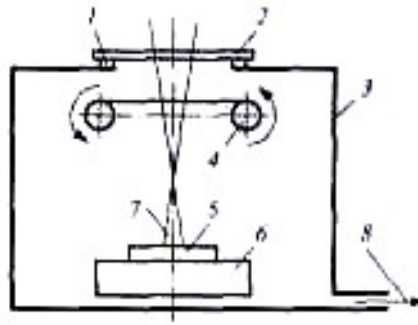


Рис. 5.13. Схема импульсной лазерной закалки в вакууме:
 1 - уплотнение, 2 - входное окно, 3 - вакуумная камера, 4 - система защиты окна, 5 - деталь, 6 - стол, 7 - лазерный луч, 8 направление движения воздуха к вакуумному насосу.

Во избежание этого внутри камеры между окном и обрабатываемой деталью помещают пленку из лавсана или другого материала, которую постоянно перематывают в процессе работы. Также используют защитные сменные стекла и двойные входные окна, что, конечно, усложняет конструкцию камеры.

Схемы импульсного лазерного упрочнения поверхности сплавов. 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:

$$v = K_n d_n f$$

Как показано на рис. 5.14, при $K_n < 1$ пятна накладываются с перекрытием, а при $K_n > 1$ — на некотором расстоянии друг от друга, т. е. между пятнами и имеются неупрочненные участки.

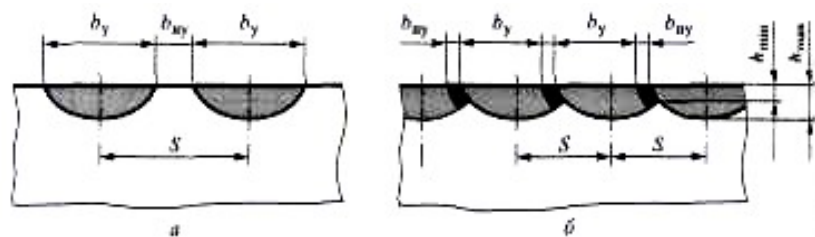


Рис. 5.14. Схемы наложения нескольких пятен при $K_n > 1$ (а) и $K_n < 1$ (б)

В таком случае в характеристиках 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 (рис. 5.15), 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

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

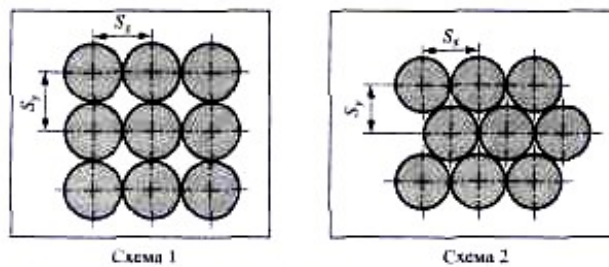


Рис. 5.15. Схемы расположения нескольких пятен с обходом по контуру при $K_n=1$

При использовании цилиндрических линз зона лазерного воздействия, полученная в результате облучения единичным импульсом, на поверхности заготовки имеет вытянутую форму (рис. 5.16). 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 $K_{yn}=S_y/b_c$.

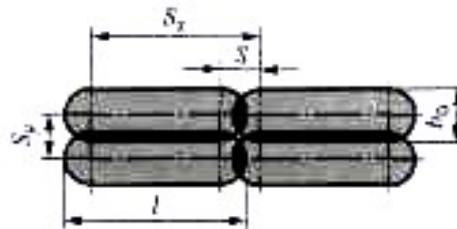


Рис. 5.16. Схема наложения пятен при использовании цилиндрической оптики

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 (см. рис. 5.15). 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_z 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 ($K_z = 0,96$), 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 $K_z = 0,94$. 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 $K_z = 0,95$ и $K_u = 0,74$.

Основные параметры лазерной закалки непрерывными лазерами 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 непрерывными лазерами. 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_{Π} , 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_{Π} лишь немного меньше единицы. Обработку плоских поверхностей осуществляют по двум схемам наложения полос: линейной (рис. 5.17, а) и клеточной (рис. 5.17, б). После наложения каждой полосы деталь или луч периодически смешают в поперечном направлении на расстояние, равное шагу S . При использовании клеточной схемы наиболее

Обработку цилиндрических поверхностей осуществляют по трем схемам: наложение односпиральных полос (рис. 5.18, а), наложение двух спиральных

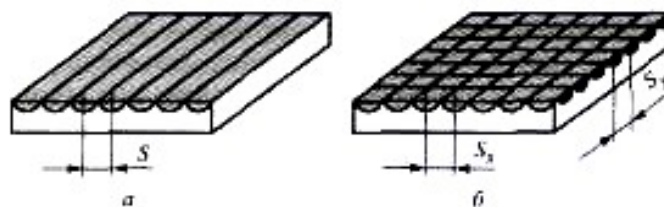


Рис. 5.17 Схемы наложения полос на плоской поверхности

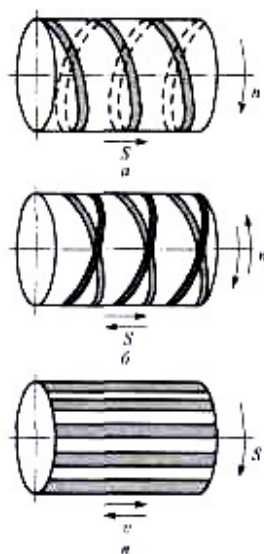


Рис. 5.18. Схемы упрочнения цилиндрических деталей

полос навстречу друг другу (5.18, б) с постоянной осевой подачей S , а также наложение полос вдоль оси по образующей с периодическим вращением детали для смещения на шаг S (5.18, в). По этим же схемам производят упрочнение внутренних цилиндрических поверхностей. Упрочнение внутренних поверхностей втулок и других деталей осуществляют с помощью отклоняющего зеркала вводимого внутрь детали (рис. 5.19, а). В этом случае возникает необходимое 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 .

В ряде случаев внутренние поверхности упрочняют, направляя лазерный луч под углом к поверхности, без ввода отклоняющего зеркала внутрь втулки (рис. 5.19, б). Последняя вращается и одновременно перемещается в продольном направлении. Поскольку при угле между осью втулки и осью лазерного луча меньше 30° из-за увеличения доли отражения происходит ухудшение качества упрочнения, ширина упрочненных участков ограничена.

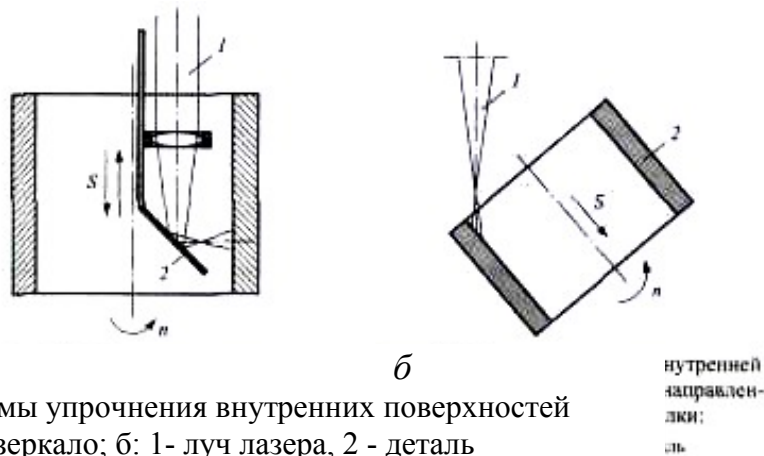


Рис. 5.19 Схемы упрочнения внутренних поверхностей
 а: 1- луч лазера, 2 – зеркало; б: 1- луч лазера, 2 - деталь

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 формировании заданного распределения возможно применение сегментных и гибких фиксирующих зеркал.

Факторы, влияющие на геометрические размеры зон лазерного воздействия

Влияние режимов лазерной обработки. Влияние режимов лазерной обработки на геометрические размеры зон лазерного воздействия, как правило, определяют при одном изменяющемся параметре. Установлено, что с увеличением скорости обработки размеры ЗЛВ уменьшаются, а при повышении мощности — увеличиваются. Из решения тепловых задач видно, что глубина ЗЛВ зависит от скорости обработки следующим образом: $h \sim 1/\sqrt{v}$. Как и при импульсной закалке, увеличение диаметра пятна $d_{\text{п}}$ при постоянных значениях P и v приводит к уменьшению глубины ЗЛВ и увеличению ее ширины до некоторого предела, после которого ширина ЗЛВ может уменьшаться.

Согласно экспериментальным данным и теоретическим расчетам, максимальная глубина упрочненного без оплавления слоя на сталях не превышает 2,5...3,0 мм, а на чугунах — 2,0...2,5 мм. При обработке с оплавлением эти значения могут быть выше.

Поскольку существует узкий диапазон режимов получения сравнительно глубоких зон лазерного воздействия без оплавления поверхности, особое внимание следует уделять мерам, повышающим эффективность процесса.

Улучшение условий фокусировки и оптимизация режимов могут привести к значительному увеличению глубины закалки без оплавления.

Необходимо стремиться к получению наиболее равномерного распределения энергии по пятну нагрева. В этом случае наблюдается увеличение глубины закаленного слоя при лазерной термической обработке без оплавления поверхности. Это связано с повышением минимальной мощности, необходимой для оплавления поверхности.

При назначении режимов лазерного термоупрочнения необходимо учитывать, что определить четкую границу режимов без оплавления трудно. Между областью режимов оплавления поверхности и областью режимов без оплавления тлеется узкая область, где наблюдаются первые признаки микрооплавления, но шероховатость не изменяется.

Снижение плотности мощности за счет увеличения диаметра пятна с одновременным уменьшением скорости обработки в режиме оплавления приводит к резкому увеличению размеров ЗЛВ.

При обработке без оплавления глубина упрочнения меньше. Снижение плотности мощности позволяет избежать оплавления поверхности и получить глубину ЗЛВ, сравнимую с глубиной, получаемой при оплавлении поверхности.

Влияние химического состава. Закономерности изменения размеров ЗЛВ при изменении содержания углерода согласуются с теоретическими представлениями. Увеличение в стали углерода приводит к снижению температуры плавления и уменьшению критической скорости охлаждения, что обуславливает увеличение глубины ЗЛВ. При наличии углерода в виде графита в черных сплавах глубина ЗЛВ уменьшается. Очевидно, это происходит из-за изменения теплофизических характеристик.

Влияние типа поглощающих покрытий и состояния поверхности. Известны три класса покрытий, обладающих достаточно высоким коэффициентом поглощения (не менее 0,6) и хорошо наносящихся на сталь: на основе оксидов Al и Zn; углерода и на основе химических соединений.

При прочих равных условиях глубина ЗЛВ в случае применения различных поглощающих покрытий может отличаться в несколько раз. Причем с увеличением плотности мощности или уменьшением скорости обработки разница в глубине ЗЛВ при использовании различных поглощающих покрытий становится меньше, что, видимо, связано с образованием расплава, разложением покрытий и уменьшением их влияния.

Таким образом, нанесение на поверхность различных поглощающих покрытий приводит к изменению глубины ЗЛВ. Следует иметь в виду, что наибольшее различие наблюдается при малых плотностях мощности и больших скорости обработки, т. е. при невысоких температурах нагрева. Наилучшими свойствами обладают покрытия, в состав которых входят оксиды цинка или алюминия с добавками пластификаторов и органической связи.

Свойства сплавов после лазерной закалки

Использование лазерного упрочнения позволяет обеспечить улучшение многих эксплуатационных показателей, а именно износостойкости, теплостойкости, остаточных напряжений в упрочненном слое, механических характеристик, коррозионной стойкости и др.

Износостойкость сплавов, упрочненных лазером. Использование лазерной закалки позволяет повысить износостойкость пар трения, работающих как в условиях сухого трения, так и в абразивно-масляной среде. Уменьшение износа деталей после лазерной закалки обусловлено рядом факторов: большой твердостью поверхности, высокой дисперсностью структуры, увеличенными несущими свойствами поверхности, уменьшенным коэффициентом трения и т. д. Наряду с этим на износостойкость оказывает влияние неравномерность свойств локальных участков обработанной поверхности. Упрочнение с перекрытием, а также нанесение отдельных пятен или дорожек лазерного упрочнения приводит к образованию разупрочненных и неупрочненных участков в местах, где металл облучался два и более раз или совсем не облучался.

Распределение остаточных напряжений. В материале, упрочненном лазерным излучением, возникают остаточные напряжения. Их величина и знак зависят от режимов лазерной обработки, химического состава материала и некоторых других факторов. Они определяют такие свойства изделий, как износостойкость, усталостные характеристики, остаточные деформации и т. д.

На поверхности стальных деталей, обработанных непрерывным или импульсным лазером, формируется весьма неоднородное распределение остаточных напряжений. Область с измененными напряжениями значительно больше по размеру, чем зона лазерного

воздействия, причем имеется определенная симметрия относительно центра полосы или пятна.

При формировании напряжений в термоупрочненном слое происходят два конкурирующих процесса. С одной стороны, развиваются растягивающие напряжения, вызванные пластической деформацией в процессе затрудненной усадки нагретых областей $\sigma_{\text{терм}}$. С другой стороны, образование мартенсита сопровождается увеличением объема области, претерпевшей превращение, что, в свою очередь, способствует возникновению сжимающих напряжений $\sigma_{\text{фаз}}$. Величина и знак остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$ зависят от соотношения термических $\sigma_{\text{терм}}$ и фазовых $\sigma_{\text{фаз}}$ напряжений. При $\sigma_{\text{терм}} > \sigma_{\text{фаз}}$ на поверхности формируются растягивающие напряжения, а при $\sigma_{\text{терм}} < \sigma_{\text{фаз}}$ — сжимающие.

Если после упрочнения произошло мартенситное превращение (это может быть обработка без оплавления или с небольшим оплавлением), то в центре полосы формируются сжимающие напряжения. На границе с необлученным металлом по обе стороны от ЗЛВ образуются растягивающие напряжения. При обработке с большой скоростью без упрочнения, т. е. когда ЗЛВ нагревалась до температур ниже критических, на поверхности полосы возникали растягивающие напряжения.

При обработке без перекрытия полос ($K_n = -0,8; -0,3$) на их поверхности имеются сжимающие напряжения, а между полосами — растягивающие. При $K_n = -0,1 \dots 0,1$, когда последняя полоса оказывает термическое влияние на предыдущую полосу, между ними формируются сжимающие напряжения. В этом случае последняя полоса оказывает термическое воздействие на зону неполной закалки предыдущей полосы, где имеется структура мартенсита с троостито-ферритной сеткой. В процессе такого воздействия в результате диффузии происходит насыщение некоторых участков твердого раствора углеродом, кроме того, возможен распад остаточного аустенита. Превращения такого типа, видимо, и приводят к формированию сжимающих напряжений.

С возрастанием коэффициента перекрытия до $K_n \sim 0,2$, когда последняя полоса оказывает воздействие на зону с мартенситной структурой предыдущей полосы, напряжения в области перекрытия увеличиваются.

Таким образом, величина и интервал изменения растягивающих напряжений при обработке с перекрытием зависит от режимов обработки и прежде всего от степени перекрытия и мощности излучения. С повышением степени перекрытия интервал изменения растягивающих напряжений по поверхности уменьшается.

Сопротивление усталости. Усталостные характеристики сплавов после лазерной закалки в определенной степени зависят от режимов обработки. Кроме того, на эти очень важные для эксплуатационных показателей деталей характеристики значительное влияние оказывают химический состав сплава, величина и знак остаточных напряжений, микрогеометрия поверхности, наличие дефектов в поверхностном слое, также особенности микроструктуры, в частности размер зерна и форма структурных составляющих. В связи с неодинаковым влиянием режимов лазерной закалки на структуру установить однозначную зависимость усталостных характеристик от режимов трудно, поэтому в большинстве случаев вопрос решают путем экспериментального рассмотрения каждого отдельного случая.

Теплостойкость сплавов. Твердость, механические и другие структурно-чувствительные свойства сплавов в результате пребывания при высоких температурах изменяются. Под теплостойкостью, как правило, понимают сохранение или изменение свойств при высоких температурах или повторных нагревах и охлаждениях.

Теплостойкость закаленной структуры в сплавах зависит от степени метастабильности структуры и диффузионной подвижности атомов. Большая искаженность кристаллической решетки, а также увеличение плотности дислокаций и вакансий в сплавах железа с углеродом, упрочненных лазером, по сравнению с традиционными видами закалки приводят к повышению интенсивности процесса распада мартенсита закалки на ферритно-цементитную смесь. Поэтому после лазерной закалки сталей степень снижения микротвердости в процессе высокотемпературной выдержки выше, чем после обычной

закалки. При нагреве до температуры 200...300 °С чугунов, высокоуглеродистых и легированных шшей возможно превращение остаточного аустенита в мартенсит, в связи с этим характер изменения микротвердости в процессе нагрева может быть несколько иным и более сложным.

При лазерной обработке сталей с оплавлением поверхности кривые зависимости микротвердости от времени выдержки при определенной температур; имеют два участка: участок интенсивного снижения микротвердости и стационарный участок с незначительным ее изменением

Механические свойства. Поскольку лазерная закалка - это метод упрочнения поверхностных слоев, то определить ее влияние на механические свойства достаточно сложно. В большинстве случаев в ходе этого процесса отмечается снижение пластичности и увеличение хрупкости по сравнению с исходным состоянием.

Одной из характеристик упругих свойств поверхности является коэффициент упругости. Пластические свойства поверхности характеризуются коэффициентом пластичности.

Шероховатость поверхности. В случае взаимодействия лазерного излучения с материалом при определенных плотностях мощности начинается микрооплавление вершин неровностей, что благоприятно сказывается на изменении параметров шероховатости. Так, на поверхности обрабатываемых сталей происходит изменение микрорельефа: уменьшение среднеарифметического отклонения профиля R_a , уменьшение высоты микронеровностей R_z увеличение радиуса закругления вершин ρ . В этом случае лазерное упрочнение способствует не только повышению поверхностной твердости, но и увеличению несущей способности поверхности, что также является одним из факторов повышения эксплуатационных свойств деталей. При обработке по заданным режимам улучшению параметров шероховатости также способствуют увеличение степени перекрытия пятен или полос и многократная лазерная обработка поверхности.

Коррозионная стойкость после лазерной обработки. Общим принципом повышения коррозионной стойкости сплавов является увеличение однородности фазового состава. В этом случае использование лазерной обработки с оплавлением поверхности некоторых сплавов, в частности чугунов, а также алюминиевых и медных сплавов, позволяет повысить коррозионную стойкость зон обработки. Так, после оплавления поверхности чугунов непрерывным лазером катодные и анодные процессы замедляются.

Вместе с тем повышенная концентрационная и структурная неоднородность при лазерной обработке углеродистых сталей, сохранение элементов исходной структуры (феррита или карбидов) и наличие остаточного аустенита обуславливают снижение коррозионной стойкости после закалки лазером. Повышенная структурная неоднородность также наблюдается при наложении нескольких пятен или полос. При наложении пятен или полос с перекрытием на поверхности, кроме структур закалки, в зонах перекрытия формируются структуры отпуска. В случае наложения пятен или полос без перекрытия на поверхности рядом со структурами лазерной закалки образуются участки неупрочненной структуры. Это может приводить к ухудшению коррозионных свойств поверхности сплавов после лазерной обработки.

Таким образом, поскольку коррозионная стойкость зависит от класса обрабатываемых материалов, режимов и технологических схем лазерной обработки, состава агрессивной среды и т. д., эксплуатационные характеристики сплавов в агрессивных средах могут быть различными.

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—SiO₂, Au — Cr₂O₃ 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 α -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 стала

Тема 6. ПОЛУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.

План:

1. Лазерное поверхностное легирование.
2. Лазерная наплавка

Лазерное поверхностное легирование

Отличительные особенности процесса лазерного поверхностного легирования. 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.

Характер проведения процессов получения поверхностных покрытий во многом зависит не только от вида и формы присадочного материала, но и от способа введения его в зону лазерной обработки. Кусковой присадочный материал - фольга, проволока, прутки — легко наносится на поверхность подложки, большая часть энергии излучения при этом теряется на отражение. Использование порошкового присадочного материала позволяет несколько уменьшить отражение, однако в этом случае возникают проблемы закрепления порошка на поверхности и повышения коэффициента его использования. Подачу присадочных компонентов при легировании наиболее просто осуществлять из газовой или жидкой фазы.

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 (рис. 6.1).



Рис. 5.1. Схема лазерного легирования с нанесением порошковой пасты на поверхность или формирования наплавленного валика при оплавлении шликерного покрытия:

1 — основной металл; 2 — шликер; 3 — лазерный луч; 4 — наплавленный металл; 5 — направление затягивания порошка в расплав; 6 — направление выброса продуктов выгорания слятки

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.

Средняя глубина образующихся легированных объемов при импульсной обработке в большинстве случаев составляет 0,3... 0,4 мм, а при непрерывной — 0,3... 1,0 мм. Необходимо учитывать, что, так как после легирования, как правило, высота напылов равна 20... 100 мкм, при последующей обработке поверхности значительная часть поверхностного слоя должна быть сошлифована.

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 диффузионный 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 H_2SiO_3 . При концентрации кремния до 0,1 % в легированной зоне сталей структура представляет собой α -железо, очевидно, мартенсит. При увеличении концентрации кремния кроме α -железа в структуре зоны образуются силициды Fe_3Si , Fe_3Si_3 , FeSi и Fe_3Si_2 . С повышением содержания кремния в зоне легирования железа или низкоуглеродистых сталей микротвердость возрастает от 8000 до 14000...15000 МПа. При наличии силицидов FeSi и Fe_3Si_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 B_4C , борного ангидрида B_2O_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 α -твердый раствор легирующего элемента в алюминии и интерметаллидные фазы FeAl, VAl₃, TiAl₃, 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.

Лазерное легирование поверхности различными соединениями. Лазерное легирование карбидами тугоплавких металлов (TiC, NbC, VC, TaC и WC), их субкарбидами (Nb₂C, Ta₂C) и сплавами на их основе, например ВКНА, ВКЗ, ВК6 и Т15К6, осуществляют следующими методами: оплавлением обмазок или слоев после электроискрового легирования, а также подачей порошка в зону лазерного воздействия с помощью инертного газа. В качестве связующего вещества для приготовления обмазок используют жидкое стекло, силикатный клей и т. д.

Практика показала возможность синтеза карбидов в легированной зоне при нанесении на поверхность смеси порошка тугоплавкого металла и графита. При этом в легированных зонах сталей микротвердость повышается до 10 000 МПа. Несмотря на большое количество легирующих компонентов в легированной зоне, микротвердость в них существенно ниже микротвердости карбидов или твердых сплавов. Это объясняется растворением карбидов при лазерном воздействии и образованием в легированной зоне повышенного количества остаточного аустенита. Только при введении значительного количества карбидов в расплав при небольшом объеме расплавленной ванны содержание карбидной фазы возрастает и твердость несколько увеличивается. Проведение лазерного легирования с подачей порошков карбидов в расплавленную ванну позволяет легко подобрать режимы, при которых карбиды растворяются не полностью. Увеличение скорости обработки приводит к существенному измельчению структуры; максимальной скорости соответствует максимальная твердость. Однако при сохранении мощности излучения размеры легированной зоны уменьшаются.

Лучшие результаты были получены при использовании твердотельных непрерывных лазеров.

Лазерная наплавка

Отличительные особенности процесса лазерной наплавки. 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-периодичесюп 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.

Наплавочные материалы. 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.

Кроме того, известно применение порошков на кобальтовой основе, их широко используют в Японии, США, Германии и Англии. Данные сплавы и сплавы на медной основе наплавляют с применением местной защиты такими инертными газами, как аргон или гелий.

При использовании присадок, содержащих активные элементы, для защиты расплава металла необходимы специальные меры. Например, в случае применения порошков, имеющих в составе TiC и WC, во избежание окисления титана и вольфрама наплавку рекомендуют проводить в вакууме.

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 оплавляється. 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. Интенсивность насыщения металла наплавки компонентами основы характеризуется долей основного металла в полученном валике, которая определяется коэффициентом перемешивания γ :

$$\gamma = \frac{F_0}{F_0 - F_n} \cdot 100\%,$$

где F_0 — площадь проплавленного основного металла; F_n — площадь наплавленного металла.

Минимальная глубина проплавления основы достигается при раздельном 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.

Использование сканатора дает возможность повысить производительность тонкослойной наплавки от 30.. 40 до 80 % путем увеличения ширины валиков либо скорости наплавки. При этом также наблюдается возрастание коэффициента использования порошка, который при наплавке со сканированием луча может составлять 84 %, а без сканирования — 51 %.

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 ΔF ;
- 4) массовый расход порошка G ;
- 5) расстояние, с которого вводят порошок L ;
- 6) угол ввода порошка α ;
- 7) направление подачи порошка вслед или навстречу по отношению к направлению движения изделия;
- 8) расстояние от центра лазерного луча до центра ввода порошка.

Рассмотрим их более подробно.

Мощность лазерного излучения. Повышение мощности излучения при постоянных значениях остальных параметров приводит к увеличению ширины k и высоты h валиков. При этом также наблюдается тенденция к возрастанию коэффициента перемешивания γ .

Скорость наплавки. С увеличением скорости обработки время облучения единицы поверхности, а следовательно, и удельная погонная энергия уменьшаются. Кроме того, уменьшаются относительный расход порошка, ширина и высота валиков. В этом случае имеется тенденция к возрастанию коэффициента перемешивания γ .

Величина расфокусировки. В процессе возрастания величины расфокусировки плотность мощности излучения снижается, вследствие чего количество используемого порошка

уменьшается. При этом высота валиков уменьшается, а их ширина вначале возрастает, а затем снова уменьшается. Коэффициент перемешивания γ также снижается.

Массовый расход порошка. При повышении массового расхода порошка ширина и высота валиков непрерывно увеличиваются, а коэффициент перемешивания γ уменьшается. Это обусловлено возрастанием плотности потока частиц и снижением прямого воздействия лазерного луча непосредственно на подложку.

Расстояние, с которого вводят порошок. С увеличением расстояния от среза сопла до зоны обработки L (дистанция нанесения) площадь порошкового пятна увеличивается, вместе с тем плотность потока частиц снижается. В результате этого ширина валиков несколько увеличивается, а их высота уменьшается. Коэффициент перемешивания γ при этом значительно возрастает.

Угол ввода порошка. Влияние угла ввода порошка α на размеры наплавленного валика определяется воздействием порошковой струи и количеством попадающего в ванну порошка. При изменении угла подачи до $30...45^\circ$ основное значение имеет воздействие струи. С повышением ее динамического давления на жидкую ванну высота валика увеличивается. В случае дальнейшего возрастания угла ввода начинает сказываться уменьшение количества порошка, поступающего в ванну, высота валика при этом уменьшается. Ширина же валиков при увеличении угла α также несколько уменьшается, а коэффициент перемешивания γ заметно возрастает.

Направление подачи порошка вслед или навстречу по отношению к направлению движения изделия. При лазерной наплавке порошок может подаваться как вслед, так и навстречу движению изделия.

В случае подачи порошка вслед движению (см. рис. 6.3, *а*) достигается удовлетворительное формирование наплавленных валиков. В данном случае под действием давления порошковой струи жидкий металл прижимается к закристаллизовавшейся части наплавки. Процесс формирования становится стабильным. Колебания геометрических размеров валиков по длине наплавленного слоя незначительны.

При подаче порошка навстречу движению образца (см. рис. 6.3, *б*) формирование валиков происходит иначе. Порошковая струя действует на расплавленный металл в направлении, противоположном направлению движения формирующегося валика, в результате чего жидкий металл растекается по поверхности подложки. Увеличение площади жидкого металла приводит к возрастанию числа частиц порошка, попадающих в расплав. При этом размеры валиков по сравнению с соответствующим значением при подаче порошка вслед движению изделия увеличиваются, вместе с тем неравномерность их размеров также повышается. При использовании данного способа наблюдается минимальное подплавление подложки, так как наличие жидкой прослойки затрудняет воздействие лазерного луча на основной металл. В связи с этим коэффициент перемешивания γ уменьшается по сравнению со значением этого параметра первого способа подачи порошка и практически стремится к нулю.

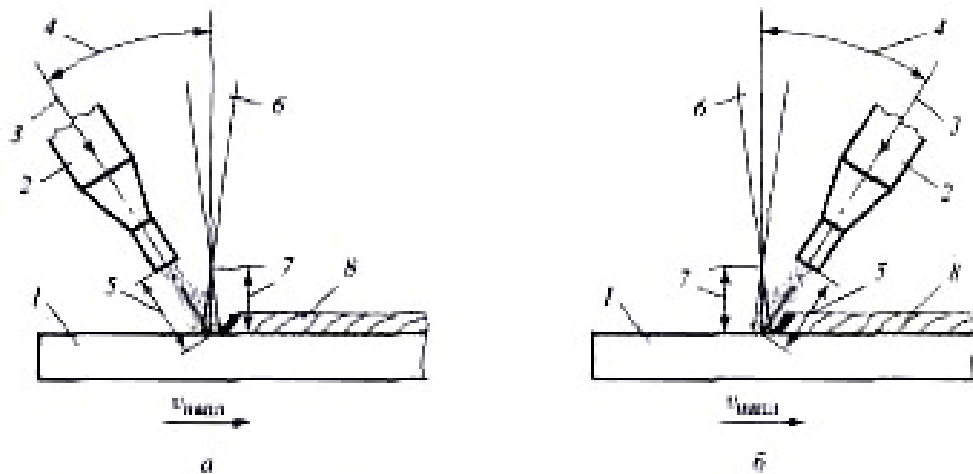


Рис. 6.3. Схема лазерной наплавки с принудительной подачей порошка вслед (а) и навстречу движению (б) обрабатываемой детали:

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

Расстояние от центра лазерного луча до центра ввода порошка. Во всех случаях, когда центр потока порошка совмещается с центром лазерного луча, из-за попадания частиц на еще не закристаллизовавшийся, но уже вышедший из-под луча наплавляемый металл, поверхность валиков становится шероховатой. Уменьшить шероховатость можно повторным оплавлением валика без подачи присадочного порошка.

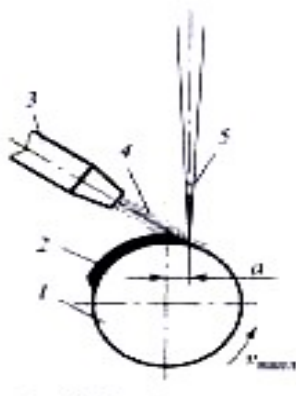


Рис. 6.4 Схема процесса наплавки тел вращения: 1 – деталь, 2 – наплавленный валик, 3- транспортирующая трубка, 4 –наплавочный порошок, 5- лазерный луч.

При наплавке тел вращения порошок рекомендуют подавать со смещением расстояния a по отношению к оси вращения (рис. 6.4). Схемы процесса наплавки при использовании импульсно-периодического излучения и непрерывного несколько отличаются. В первом случае вначале порошок подают на поверхность изделия на некотором расстоянии L перед лучом во время обработки, а затем переплавляют лазерным излучением.

Наплавка с принудительной подачей порошкового присадочного материала. Имеются два способа подачи порошкового присадочного материала: газовым потоком; под действием гравитационных сил.

Наиболее эффективным и развиваемым в настоящее время является процесс непосредственной транспортировки порошкового материала в зону наплавки с помощью газового потока. Использование инертных газов (чистых или их смесей) одновременно с подачей порошка позволяет обеспечить защиту расплавленной ванны от окисления. Для подачи порошка применяют специальные устройства — дозаторы. Схема процесса наплавки с подачей порошка газовой струей приведена на рис. 6.5. Наплавочный порошок загружают в емкость 4, транспортирующий газ подают в специальное устройство, называемое инжектором 7, в котором сечение проходного канала уменьшается по длине. При прохождении газа через инжектор его скорость изменяется, так как его расход остается постоянным. При этом давление в узком сечении резко снижается, в результате чего происходит подсос порошка из емкости 4. Возникающая газшорошковая смесь подается в область действия лазерного луча 3. Недостатками этого способа являются:

- 1) малый коэффициент использования порошка;

- 2) динамическое воздействие газовой струи на жидкую ванну;
- 3) неустойчивость подачи порошка при его малых расходах;
- 4) необходимость подогрева газовой смеси, а также удаления из нее влаги.

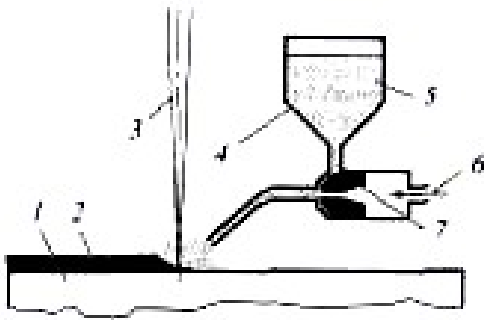


Рис. 6.5 Схема процесса наплавки с подачей порошка газовой струей:
1 – деталь, 2 – наплавленный валик, 3 – лазерный луч, 4 – емкость для порошка, 5 – наплавочный порошок, 6 – транспортирующий газ, 7 – инжектор.

Использование подачи порошкового присадочного материала под действием гравитационных сил является самым простым из известных способов. Однако в случае применения очень мелкого порошка (диаметр — менее 0,04 мм) под действием молекулярных сил возможно образование конгломератов из нескольких частиц, что может нарушить равномерность подачи. Во избежание этого используют специальные устройства, например механические, электромагнитные или пневматические вибраторы и т. п. Это позволяет обеспечить высокую стабильность подачи порошка при его малых расходах.

Поскольку существенным недостатком таких устройств является отсутствие возможности применения защитного газа, указанные питатели

используют, как правило, для наплавки самофлюсующимися порошками.

Дефекты, возникающие при лазерной наплавке. При лазерной наплавке в наплавленном валике могут возникать следующие дефекты: кристаллизационные трещины, отслоения, занижения по высоте, вырылы, вспучивания и трещины после механической обработки (рис. 6.6).

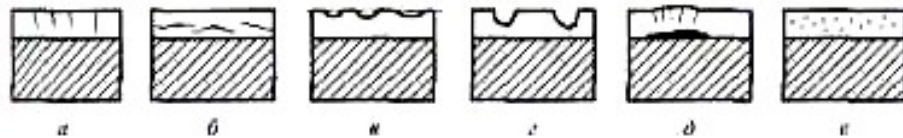


Рис. 6.6. Возможные виды дефектов в наплавленных покрытиях: а — трещины; б — отслоения; в — занижение по высоте; г — вырылы; д — вспучивания и трещины после механической обработки; е — пористость

Одна из причин, сдерживающих внедрение процесса лазерной наплавки, состоит в образовании трещин в наплавленных слоях. Этот вид дефектов являясь одним из самых распространенных. В результате образования трещин в покрытиях усталостная прочность деталей снижается более чем в 10-20 раз, что может стать причиной преждевременного разрушения и выхода изделия из строя.

При непрерывном режиме лазерной наплавки в отдельно расположенных валиках образуются поперечные трещины, которые находятся друг от друга на расстоянии 0,8 мм и более по длине наплавки.

В слое, состоящем из нескольких перекрывающих друг друга валиков, наряду с поперечными трещинами, переходящими из валика в валик, образуются продольные трещины.

Отмеченное разнообразие мест расположения трещин свидетельствует о разнице в механизмах их образования.

На образование трещин оказывают влияние технологические факторы. Известно, что при сварке различных сплавов, в том числе и никелевых, во избежание горячих трещин режим часто изменяют. Опыт сварки никелевых сплавов с применением концентрированных источников нагрева дает положительные результаты повышения стойкости против образования кристаллизационных трещин. С увеличением скорости охлаждения интенсивность процессов ликвации снижается, что способствует сужению температурного

интервала хрупкости (ТИХ) в результате смещения его нижней границы в высокотемпературную область. При этом деформационная способность металла возрастает, а максимальные значения продольных и поперечных деформаций в оплавленном металле снижаются, вследствие чего его технологическая прочность резко повышается.

Скорость наплавки оказывает неоднозначное влияние на склонность металла валика к возникновению трещин, зависимость коэффициента трещинообразования от скорости наплавки имеет максимум.

Повышение мощности лазерного излучения приводит к увеличению склонности наплавленного металла к возникновению трещин.

На самостоятельное изучение:

1. Рекомендации по разработке технологического процесса лазерной наплавки.

Тема 7. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА МЕТАЛЛОВ

План:

1. Классификация способов лазерной сварки.
2. Технологические особенности лазерной сварки.
3. Физические процессы образования сварного соединения при сварке материалов малых толщин и с глубоким проплавлением.
4. Технология лазерной сварки материалов малых толщин и с глубоким проплавлением.

Классификация способов 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.

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.

Энергетические признаки. Наиболее общими параметрами характеризующими энергетические признаки, являются плотность мощности E , Вт/см², и длительность воздействия излучения τ , с.

Плотность мощности, необходимая и достаточная для осуществления процессов сварки, находится в диапазоне $10^5 \dots 10^7$ Вт/см². Нижний предел ограничен плотностью мощности менее 10^5 Вт/см², 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/см², 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:

$$\tau = d / v_{св}$$

Вторая группа — плотность мощности $E = 10^6 \dots 10^7$ Вт/см², 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/см², 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.

Технологические признаки. 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.

Экономические признаки. 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.

Технологические особенности 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/см²).

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 процессы образования сварного соединения при сварке материалов малых 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.

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 λ_T — коэффициент теплопроводности; α — коэффициент температуропроводности; τ — 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 λ_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 γ — плотность материала.

Следовательно, основным параметром, определяющим критическое значение теплового потока, является коэффициент температуропроводности α , вычисляемый по формуле

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

Величина α 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.

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_{ce} 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 τ , по достижении которого происходит взрывное вскипание некоторого объема металла.

В общем случае τ 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 τ_1 требуемого для нагрева материала до температуры кипения, и времени τ_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 η , т. е. отношением мощности излучения, прошедшего через факел, к мощности лазера, по зависимости:

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

где l — толщина плазменного облака; α — 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.

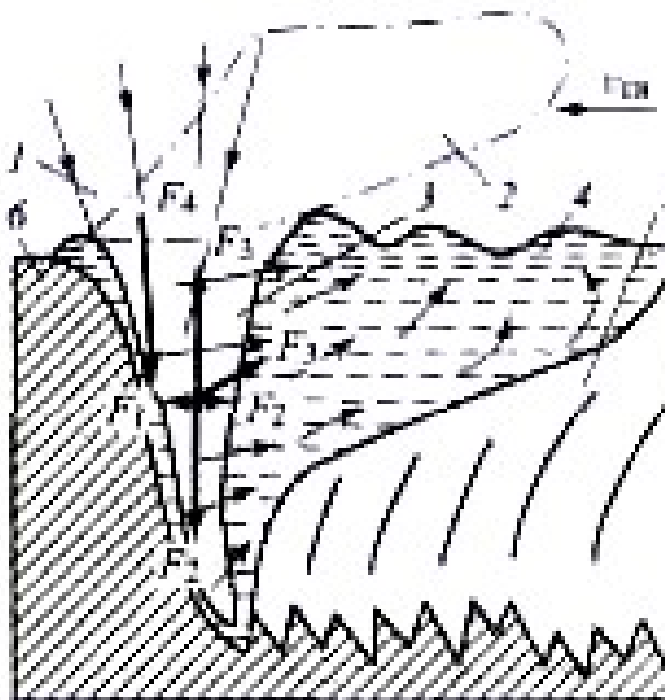


Рис. 7.1 Схема продольного сечения сварочной ванны

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 γ – 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.

Технология лазерной сварки 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

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

где τ — 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 (Вт/см²), 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:

$$v_{св}df(1-k)$$

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 (рис. 7.2).

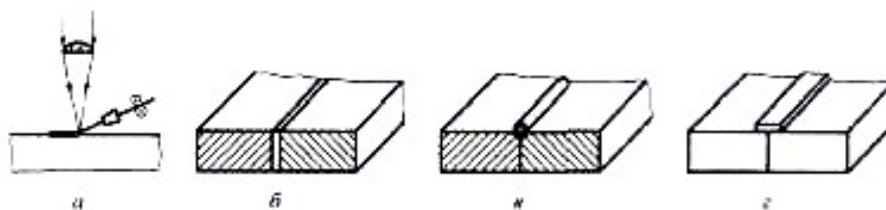


Рис. 7.2. Способы ввода присадочного материала в виде:
а — проволоки; б — прокладки; в, г — накладки

Наиболее рациональным является *параллельное соединение проволок* (рис. 7.3, а). 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.

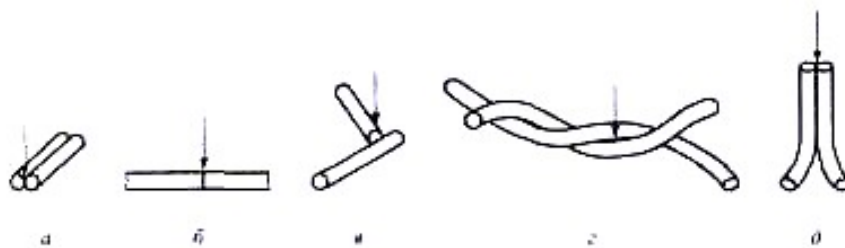


Рис. 7.3. Типы сварных соединений проволоки:

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

При сварке проволоки *встык* (рис. 7.3, б) 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* (рис. 7.3, в и д). 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 (рис. 7.3, г). 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* (рис. 7.3, д) 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* (рис. 7.4, а) необходимо обеспечить плотное сжатие свариваемых деталей.

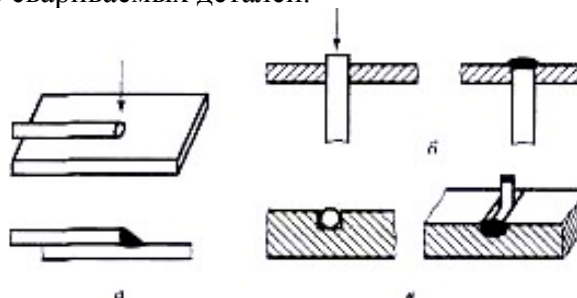


Рис. 7.4. Типы соединений проволоки с массивными деталями:

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 (см. рис. 7.4, б и в). 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.

В зависимости от конструкции детали рекомендуются различные типы соединений. При сварке плоских выводов к проводникам печатных плат могут быть использованы схемы, показанные на рис. 7.5.

В случае применения первой схемы (см. рис. 7.5) излучение направляют на свариваемые детали так, чтобы оно одновременно попадало как на плоский вывод, так и на проводник печатной платы. Для выполнения такого соединения необходимы наименьшие затраты энергии излучения, однако при этом не всегда удовлетворяются требования к прочности. Поэтому целесообразно применять двух- и трехточечное соединение.

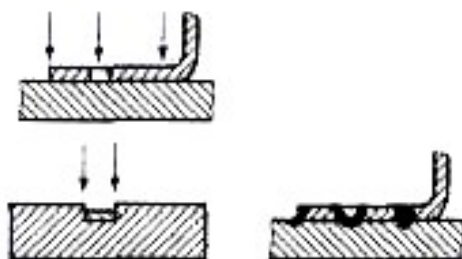


Рис. 7.5 Типы сварных соединений тонких плоских деталей с массивными

Технологии лазерной сварки 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 ΔF .

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 проплавливающую 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 aberrаций 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

$$Q = P/v_{св}$$

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 λ_T — коэффициент теплопроводности материала; T_k — температура кипения; α — 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 газоплюсовая. 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 перекося кромок свариваемых деталей;
обеспечивать оптимальное формирование проплавления и поверхности сварочного шва.

На самостоятельное изучение

1. Сварка сталей.
2. Сварка алюминиевых и медных сплавов.
3. Сварка никелевых сплавов.
4. Сварка титановых сплавов.
5. Сварка керамических и композиционных материалов.

Тема 8. ЛАЗЕРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

План:

1. Особенности разделения материалов.
2. Технология лазерной резки неметаллических материалов.
3. Лазерная обработка хрупких материалов.
4. Технология газолазерной резки металлических материалов.

Особенности лазерного разделения материалов

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.

Существует несколько механизмов лазерного разделения материалов:
испарение;

плавление с удалением расплава из зоны обработки;

термораскалывание;

термохимическое воздействие.

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.

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 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_{ϕ} — 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.

Технология лазерной резки неметаллических материалов

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

Влияние энергетических параметров. Энергетические параметры процесса резки можно рассчитать с использованием формулы, определяющей значение максимальной температуры для быстродвижущегося 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; λ_T — коэффициент теплопроводности материала; R — коэффициент отражения; v_p — скорость резки; α — 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; ρ — 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.

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 Ψ :

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

где L_p — удельная энергия химической реакции.

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

Влияние оптических параметров. 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 одинаковых 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 ϕ 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.

Влияние газодинамических параметров. 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.

На самостоятельное изучение

1. Резка неметаллических материалов: кварц, стекло, стеклотекстолит.

Лазерная обработка хрупких материалов

Лазерное управляемое термораскалывание. 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; δ — глубина трещины; λ_T — коэффициент теплопроводности, Вт/(м К); ρ — плотность стекла, кг/м³; 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.

Технология газолазерной резки металлических материалов

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.

Механизмы газолазерной резки 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 CO₂-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 (рис. 8.1).

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 (см. рис. 8.1, а).

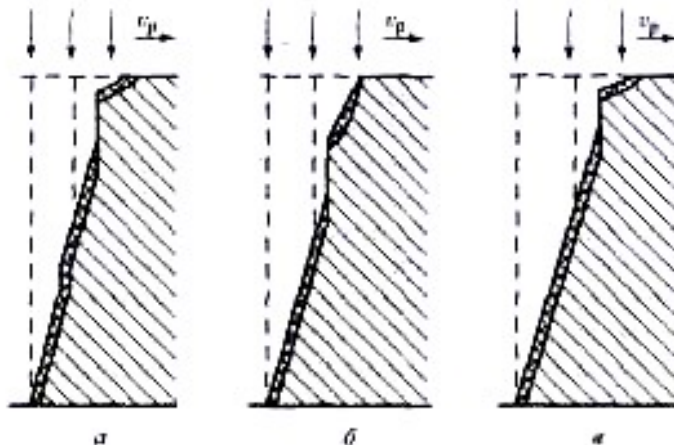


Рис. 8.1. Стадии разрушения в процессе резки металлов непрерывным излучением при низких скоростях (нестационарный механизм)

При последующем перемещении материала относительно лазерного излучения оно попадает на зоны, расположенные выше канала, в результате чего они подплавляются (см. рис. 8.1, б). 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 (см. рис. 8.1, в). 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.

Тема 9. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

План:

1. Лазерный отжиг, рекристаллизация и легирование полупроводников.
2. Лазерное нанесение тонких пленок и изменение химического состава поверхностных слоев деталей электронных приборов.
3. Лазерная обработка пленочных материалов .

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.

Лазерный отжиг, рекристаллизация и легирование полупроводников

Метод лазерного отжига полупроводников используется для получения равновесных структур в слоях и пленках. Задача лазерной технологии заключается в том, чтобы обеспечить расположение ионов в области, находящейся ближе к поверхности подложки, и уменьшить количество дефектов.

Наиболее существенные преимущества лазерного отжига перед традиционным, термическим, состоят в следующем.

1. Проведение отжига без ухудшения параметров подложки; имеется возможность осуществления программированного отжига сфокусированным лучом отдельных активных областей на пластине.
2. Высокая скорость кристаллизации ($\sim 10^9$ нм/с), что позволяет получить требуемое качество восстановленной структуры и обеспечить высокие концентрации электроактивной примеси, значительно превышающие пределы растворимости.
3. Очень малая продолжительность отжига (до 10^{-7} с), что исключает необходимость обеспечения вакуумных условий или специальной инертной атмосферы для предотвращения загрязнения поверхности нежелательными неконтролируемыми примесями; кроме того, это облегчает проведение процесса имплантированного легирования полупроводников с низкими температурами сублимации и разложения.

Основным недостатком лазерного излучения применительно к отжигу полупроводников является неравномерность распределения энергии по его поперечному сечению (из-за характера распределения, модового состава и когерентности). Для улучшения качества излучения используют специальные оптические системы, но это приводит к потерям до 40 % излучения.

Отжиг осуществляют двумя методами: импульсным излучением и непрерывным излучением.

Количество примеси влияет на условия отжига посредством изменения коэффициента поглощения полупроводника при длине волны лазерного излучения. Это определяет пороговую энергию отжига и время образования и поддержания области плавления. При больших количествах примеси пороговая энергия снижается и примесь может проникать глубже в подложку.

Значительным преимуществом отжига импульсным лазером является неравновесный характер термодинамики плавления. Это дает возможность получать отоженные слои с широким диапазоном концентраций примесей по сравнению с методом общего нагрева образца.

При отжиге полупроводников лазерами непрерывного действия имеет место эпитаксиальная перекристаллизация твердой фазы. Процесс аналогичен происходящему при термическом отжиге в печи и протекает без расплавления. Осуществление отжига непрерывным лазером не приводит к изменению распределения примесных атомов и созданию поверхностных нерегулярностей. С другой стороны, поскольку термический отжиг является равновесным процессом, возможности при его проведении по сравнению с импульсным отжигом ограничены.

Лазерное нанесение тонких пленок и изменение химического состава поверхностных слоев деталей электронных приборов

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 CO₂-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/см² и длительностью импульса $\tau = 10^{-3} \dots 10^{-6}$ с. Такие режимы используют для осаждения однокомпонентных металлических материалов: Cr, 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/см² 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/см²) и короткими импульсами ($\tau = 10^{-8}$ с). При этом испарение субстрата происходит по механизму термического взрыва.

Лазерная обработка пленочных материалов

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.

Подгонка параметров электронных 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.

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.

Тема 10. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

План:

1. Методы быстрого прототипирования с использованием лазерного излучения
2. Лазерная динамическая балансировка деталей.
3. Лазерная технология создания объемных изображений в стекле.
4. Лазерная пайка металла с керамикой.

Методы быстрого прототипирования с использованием лазерного излучения

Развитие процессов послойного синтеза, также называемых аддитивными технологиями, из стадии лабораторных исследований в конце 1980-х годов, в начале 1990-х годов достигло уровня коммерческого и промышленного использования. В настоящее время их успешно применяют в ряду технологий гибких процессов, предшествующих традиционным заготовительным процессам, например при производстве формообразующей оснастки (штампов, пресс-форм, литейных форм и т. д.). Конкурентоспособность промышленной продукции в основном определяют качество и сроки изготовления деталей данными методами. Эти процессы находят применение в различных отраслях промышленности; особенно они эффективны в машиностроении, автомобиле- и самолетостроении, производстве медицинской техники (оснастки) и инструментов и др.

Комплекс работ по изготовлению детали методами быстрого прототипирования включает три основных этапа. На первом этапе создается компьютерная модель будущей детали одним из следующих методов; прямым компьютерным моделированием (AutoCAD, Solid Works, Euclid и др.); методом фотограмметрии; сканированием на 3D-сканерах; по данным, полученным на томографе.

На втором этапе на установке прототипирования по созданной компьютерной модели осуществляется выращивание прототипа будущей детали.

На третьем этапе по выращенному прототипу изготавливают металлические отливки с помощью точного литейного оборудования и специальных технологий.

Лазер как инструмент формирования поверхности используют в следующих методах быстрого прототипирования: LOM-процесс; SLS-процесс; DMD-процесс и SLA-процесс.

LOM (Laminated Object Manufacturing)-процесс — это процесс изготовления объектов с использованием ламинирования. Принцип процесса заключается в вырезке CO₂-лазером тонких слоев из бумаги, пластика или фольги и наклейки их друг на друга в заранее заданной последовательности. Контуры сечений создаются путем управления движением луча лазера по компьютерным данным, слой за слоем.

Данный метод отличается достаточным быстродействием и полным отсутствием

деформации формы изделия, однако возникают трудности, связанные с утилизацией отходов раскроя и присоединением листов друг к другу. Точность изготовления деталей составляет 0,25 мм.

SLS (Selective Laser Sintering)-процесс — это процесс селективного лазерного спекания, при котором изделия изготавливают из порошковых материалов путем спекания с помощью энергии лазерного луча. Попадая на тонкий слой порошка, лазерный луч спекает его частицы и формирует твердую массу в соответствии с геометрией детали. В качестве материалов используют полиамид, полистирол, кварцевый песок и порошки некоторых металлов. Эти материалы являются наиболее дешевыми из всех, применяемых при проведении быстрого прототипирования.

Недостатком данного метода является необходимость специальной обработки моделей, снижающей влияние влажности. Детали, полученные данным методом, имеют невысокую точность.

DMD (Direct Metal Deposition)-процесс — это процесс, состоящий в непосредственном нанесении металлов, что позволяет изготавливать металлические детали со 100%-ной плотностью. В отличие от традиционных технологий металлообработки, удаляющих материал, такой процесс является уникальным аддитивным процессом, обеспечивающим широкий выбор материала и позволяющий точно контролировать место его нанесения для получения конечного продукта. Изготовленный материал имеет механические и физические характеристики, идентичные свойствам материала, полученного традиционной ковкой или литьем.

SLA (Stereo Lithography Apparatus)-процесс, или лазерная стереолитография, состоит в изготовлении твердых копий моделей посредством воздействия лазерного излучения на жидкие фоточувствительные полимерные композиции (ЖФПК).

Основой стереолитографии является локальное изменение фазового состояния однородной среды (переход жидкость — твердое тело) в результате фотоинициированной в заданном объеме полимеризации. Процесс лазерной стереолитографии включает в себя создание компьютерного образа детали, его разбиение на тонкие слои, расчет траектории движения лазерного луча, заполняющего каждое сечение, и последовательное воспроизведение соответствующих поперечных сечений на ЖФПК сфокусированным пучком инициирующего полимеризацию лазерного излучения.

Лазерная динамическая балансировка деталей

Повышение точности, надежности и долговечности вращающихся деталей в значительной степени зависит от снижения степени неуравновешенности (дисбаланса). Дисбаланс вызывает увеличенные неравномерные нагрузки на опоры качения или скольжения, их повышенный износ и как следствие - разрушение и выход из строя ответственного узла машины.

Устранить дисбаланс можно механическим способом (сверлением, фрезерованием или шлифованием), а также электрофизическими методами воздействия на материал (электроэрозионного, электронно-лучевого, электрохимического, взрывающихся проволочек и др.).

Во время балансировки необходимо удалять массы материала от нескольких миллиграммов (в случае гироскопов) до нескольких килограммов (лопасти судовых винтов). При этом точность удаления материала может достигать 1 мг. Стоимость обычных методов удаления материала (сверления, фрезерования, полирования) на 1-2 порядка ниже стоимости лазерного метода при той же электрической мощности. Обычными методами удаляется на 1-2 порядка больше материала, чем лазерным. Экономически лазер выгодно использовать только при удалении материала во время вращения, очень малых количеств материала, твердого материала, материала в труднодоступных зонах (включая вакуум), а также при подгонке легких, механически чувствительных роторов.

Применение лазерного излучения для удаления дисбаланса в балансировочных установках позволяет не только повысить производительность и точность процесса, но и добиться полной автоматизации этой сложной и трудоемкой операции.

Удаление материала, создающего дисбаланс, с обрабатываемой детали происходит в результате лазерной эрозии. При воздействии лазерного импульса на поверхность вращающейся детали вследствие плавления и испарения материала образуется каверна, размеры которой (длина, глубина) зависят как от характеристик лазерного излучения и свойств материала, так и от скорости вращения детали.

Лазерная технология создания объемных изображений в стекле

В последнее время все более широкое распространение приобретает лазерная объемная обработка стекла. Данная технология является уникальной в том смысле, что в процессе обработки импульсное лазерное излучение фокусируется в объем материала, в результате чего в стекле происходят внутренние микроразрушения; при этом поверхность материала не подвергается воздействию. Перемещая фокус излучения по вертикали, а стеклянную заготовку в плоскости по двум осям, можно получить практически любое объемное изображение. Управление процессами перемещения и обработки осуществляется автоматически по сигналам от компьютера, в котором заложены необходимые программы.

Основным классом лазеров, применяемых для формирования изображений в стекле, с самого начала их внедрения и по сегодняшний день являются твердотельные Nd: YAG лазеры, излучение которых стеклом поглощается незначительно.

Лазерная пайка металла деталей с керамикой

Металлокерамические узлы находят широкое применение в микроэлектронике, радиотехнике, атомной энергетике и других отраслях промышленности. Однако разработанные способы получения металлокерамических соединений многостадийны и энергоемки, так как существует необходимость проведения технологического процесса в защитной атмосфере (вакуум, инертная или восстанавливающая среда). Большинство промышленных технологий основано на многократном нагреве, что приводит к значительному увеличению общего времени пайки и снижению механической прочности узла.

Одним из преимуществ лазерной пайки является возможность направления сфокусированного излучения в труднодоступные участки изделия. Это позволяет соединять детали, находящиеся в замкнутом объеме, например внутри электронных ламп, а также производить пайку через прозрачную керамику.

В условиях лазерной пайки керамики с металлом необходимость использования вакуумных камер или камер с инертными средами отпадает, так как технологический процесс можно проводить на воздухе, а любой газ подавать непосредственно в зону воздействия лазерного излучения.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторный практикум выполняется по индивидуальному графику бригадой, состоящей, как правило, из двух студентов.

Лабораторные работы выполняются студентами только в дни и время, установленные расписанием.

Студенты должны бережно относиться к оборудованию и приборам лаборатории.

Не следует трогать не используемые в работе ручки и переключатели приборов.

За одно занятие возможно выполнить только одну работу.

Студенты обязаны подготовиться к лабораторной работе, что может быть проверено кратким опросом в начале занятий.

Перед выполнением эксперимента студент должен пройти собеседование с преподавателем и получить **допуск** к работе. Для получения допуска следует самостоятельно изучить и законспектировать:

-Теорию изучаемого явления, основные понятия, формулы.

-Принцип работы установки, вывод рабочих формул.

Более подробно требования к подготовке определяются контрольными вопросами.

Все данные измерений студенты записывают в **личный лабораторный журнал**.

Утерянный лабораторный журнал подлежит восстановлению.

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.

Оформление отчёта должно удовлетворять следующим требованиям:

Для размерных величин обязательно указывать их размерность.

Для величин, имеющих погрешности, таковые обязательно указываются. Также приводятся формулы, по которым рассчитываются погрешности или методы их определения и оценки.

Рисунки и графики должны быть аккуратно выполнены на "миллиметровке" или напечатаны на принтере. Размеры рисунков не менее 9см x 12см. Допускаются цветные иллюстрации.

Рисунки, графики и таблицы должны быть пронумерованы и подписаны. Рисунки и графики или подписи к ним должны содержать необходимые пояснения. Оси должны быть подписаны или оговорены в подписи к графику.

Величины, имеющие погрешности, указываются на графике с погрешностью. Если все точки на графике имеют одинаковые погрешности, допускается указывать погрешность только у одной точки.

При использовании МНК (или других методов) обязательно указываются погрешность полученных параметров, значение s^2 (хи-квадрат) и формула, по которой рассчитывалась эта величина.

Для получения зачета по данной лабораторной работе студент представляет преподавателю оформленный отчет **со всеми расчетами**.

Каждую лабораторную работу следует начинать с **новой** страницы, пропустив 2-3 чистых листа. Чистые листы нужны для возможных исправлений и доработок (перерасчетов) предыдущей работы, не затрагивающих следующую.

При невозможности посещения занятия (например, в случае болезни), студент должен предупредить об этом преподавателя.

К выполнению работы не допускаются учащиеся, которые: не подготовились к работе; опоздали к началу занятий более, чем на 30 минут; не представили отчёт или не сдали коллоквиум по предыдущей работе; пропустили два и более занятий.

Схема оформления отчета :

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № X-XX

НАИМЕНОВАНИЕ РАБОТЫ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:.....

ОБОРУДОВАНИЕ:.....

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ:

(Записываются контрольные вопросы и ответы, схемы, формулы)

.....
.....

СХЕМА УСТАНОВКИ:

РАБОЧИЕ ФОРМУЛЫ:

.....
.....

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ (таблица, дополнительные данные).

РАСЧЕТЫ

(следует привести **все расчеты**)

.....
.....

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

.....

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Ознакомление с основными положениями безопасной эксплуатации лазерных установок.

Классификация лазеров по степени опасности.

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.

Рассмотрим классификацию лазеров по степени опасности генерируемого ими излучения. Воздействие лазерного излучения на биологические объекты зависит от плотности мощности (энергии) излучения, времени облучения, длины волны излучения, длительности и периодичности импульсов. С позиции лазерной безопасности лазеры классифицируются по способности первичного и вторичного (отраженного) излучения вызвать существенные повреждения глаз и кожи. По степени опасности лазеры подразделяются на следующие классы: 0-безопасные, 1-малоопасные, 2-средней опасности, 3-опасные, 4-высокой опасности.

Безопасные это лазеры, выходное излучение которых не представляет опасности для биологических тканей при воздействии на них.

Малоопасные это лазеры, эксплуатация которых связана с опасностью воздействия прямого и зеркально отраженного излучения только на глаза.

Средне опасные, это 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.

Высоко опасные это лазеры, в процессе эксплуатации которых наблюдаются все факторы, характерные для 1-3 классов, а также ионизирующее излучение с уровнем, превышающим установленные пределы.

Вредные факторы, сопутствующие работе на лазерных установках

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

К первому типу относятся факторы, воздействующие в основном на отдельные органы. Это следующие факторы: лазерное излучение, аэродисперсные системы, вредные химические вещества и шум.

Ко второму типу относятся факторы, воздействующие на весь организм: вибрация, электромагнитные поля, повышенное напряжение, ионизирующее излучение, микроклиматические условия.

Рассмотрим подробнее опасные и вредные производственные факторы, существующие при эксплуатации лазеров:

Лазерное излучение. Основную опасность лазерное излучение представляет при воздействии на органы зрения. Повреждение глаз может произойти в результате воздействия

как прямого, так и отраженного излучения. В производственных условиях облучение прямым лазерным излучением возможно лишь при грубом нарушении правил техники безопасности. Степень опасности этого фактора определяется плотностью мощности (энергии) излучения лазера, длиной волны, условиями его использования и режимом работы (импульсный, непрерывный). Лазерное излучение является определяющим при оценке степени безопасности технологических процессов при использовании лазерных установок.

Аэрозоли. Образование аэрозолей (пары, мелкие частицы) связано с взаимодействием лазерного излучения с материалом. Аэрозоли могут вдыхаться в легкие, а также воздействовать на кожные покровы. В последнем случае опасность представляют горячие брызги материала, которые могут приводить к ожогу кожи. Количество аэрозольных образований связано с плотностью энергии (мощности) лазерного излучения, свойствами материала, взаимодействующего с излучением, и режимом работы лазера (импульсным, непрерывным).

Вредные химические вещества. Эта категория опасных и вредных факторов обусловлена образованием токсичных (отравляющих) веществ и газов при взаимодействии лазерного излучения с различными материалами, содержащими токсичные элементы, или в результате реакций с окружающей средой. Кроме того, вредные химические вещества могут выделяться из отдельных элементов работающей лазерной установки. Химически токсичные вещества могут воздействовать как на органы дыхания, так и на кожу.

Шум. Он возникает при работе лазерных установок, имеет различный характер и может быть стабильным при работе лазерных установок в непрерывном режиме и импульсным – при эксплуатации твердотельных лазеров. В основном шум действует на органы слуха.

Вибрация. Возникновение вибрации, как правило, неразрывно связано с шумом. В процессе эксплуатации лазерных установок вибрация возникает в результате работы отдельных деталей и механизмов в целом. Она воздействует на весь организм.

Повышенное напряжение. Источники питания большинства лазеров имеют повышенное напряжение – от десятков до тысяч вольт. Они не обладают какими либо специфическими особенностями, отличающими их от обычных электротехнических устройств. В связи с этим безопасность работы с ними регламентируется соответствующими правилами.

Ионизирующее излучение. Высокотемпературная плазма, образующаяся при взаимодействии мощного лазерного излучения с материалом, может явиться источником нейтронного и гамма-излучения.

Микроклимат. Микроклиматическими условиями при эксплуатации лазерных установок определяются рядом параметров: скоростью движения воздуха в рабочих помещениях, влажностью воздуха, температурой в помещении, фоном, обусловленным работой установки и приспособлений.

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

В таблице 1 приведены опасные и вредные производственные факторы, подлежащие контролю в зависимости от класса лазерной установки.

Знание сведений, приведенных в таблице 1, необходимо как службам охраны труда, так и операторам лазерных установок. Как видно из таблицы, для лазеров 0 класса контроль опасных и вредных факторов не требуется, с ними следует работать как с обычными электронными приборами.

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.

Контролируемые опасные и вредные факторы

№	Опасные и вредные производственные факторы	Класс лазеров				
		0	1	2	3	4
1	Повышенное электрическое напряжение	- (+)	+	+	+	+
2	Микроклимат	+	+	+	+	+
3	Прямое лазерное излучение	-	+	+	+	+
4	Зеркально отраженное лазерное излучение	-	+	+	+	+
5	Диффузно отраженное лазерное излучение	-	-	- (+)	+	+
6	Шум, вибрации	-	-	- (+)	+	+
7	Аэрозоли	-	-	-	+	+
8	Газы	-	-	-	+	+
9	Электромагнитное излучение	-	-	-	- (+)	+
10	Ионизированное излучение	-	-	-	-	- (+)

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.

Коллективные и индивидуальные средства защиты от лазерного излучения

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.

Действие лазерного излучения на глаза

Глаза являются наиболее уязвимым органом человека, так как обладают способностью фокусировать лазерное излучение. Рассмотрим более подробно, как работает человеческий глаз (рис. 1).

Глаз имеет почти сферическую форму, которая определяется наружной оболочкой – склерой. В передней части склера переходит в плотную, но прозрачную для световых лучей роговицу. Поверхность склеры покрыта очень тонкой прозрачной пленкой – конъюнктивой, переходящей на заднюю поверхность век. Позади роговицы находится радужная оболочка, или радужка, содержащая пигмент определяющая цвет глаз. В центре радужной оболочки находится отверстие – зрачок, размеры которого могут изменяться в зависимости от количества света, поступающего в глаз. В сумерках и в темноте размеры зрачка максимальны и составляют 7-8 мм. При ярком солнечном освещении диаметр зрачка уменьшается до 1.6-2 мм.

Глаз человека воспринимает электромагнитное излучение (видимый свет) в диапазоне от 0.4 до 1.4 мкм. Наибольшая прозрачность глаза, доходящая почти до 100%, лежит в области длин волн от 0.5 до 0.9 мкм. Роговица глаза детей способна частично пропускать излучение ультрафиолетового диапазона, с возрастом эта способность утрачивается. Спектральные характеристики глаза определяют особенности воздействия на него электромагнитного излучения различных диапазонов.

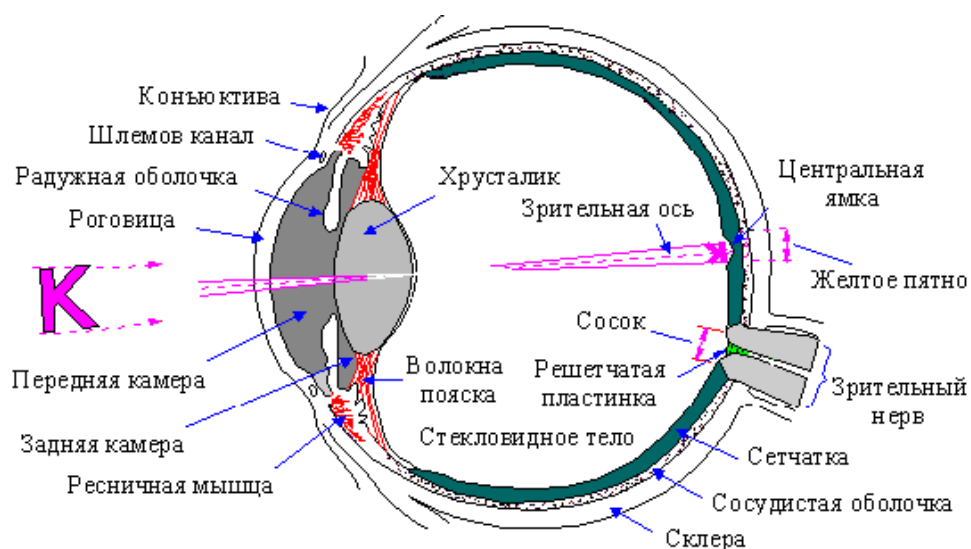


Рис.1. Схема горизонтального разреза правого глаза.

Излучение ультрафиолетового диапазона (6-300 нм) интенсивно поглощается роговицей глаза и до сетчатки не доходит. Поэтому поражение глаз мощным ультрафиолетовым излучением носит характер поверхностных ожогов. При этом обычно поражается роговица и конъюктива, поглощающие основную часть энергии ультрафиолетового излучения. В результате поражения возникает воспалительный процесс (фотокератоконъюнктивит), сопровождающийся сильным жжением в глазах. Примером фотокератоконъюнктивит является «снежная слепота», возникающая вследствие пребывания на снегу в высокогорье без защитных очков. В этом случае поражающим фактором является сильное ультрафиолетовое излучение Солнца.

Наибольшее поражение роговицы происходит при резонансном поглощении ультрафиолетового излучения.

При длине волны излучения менее 320 нм практически вся энергия поглощается в роговице. При длине волны 320-400 нм часть энергии проникает в хрусталик и может вызвать в нем нежелательные изменения. Например, излучение с длиной волны 360 нм может возбуждать в хрусталике флуоресценцию, вызывая при этом диффузное помутнение, способное понижать остроту зрения и приводить к некоторому утомлению глаз. Следует заметить, однако, что серьезные поражения хрусталика ультрафиолетовым излучением, например, катаракта, встречаются редко, так как большая часть энергии поглощается роговицей.

При импульсно-периодическом или прерывистом воздействии ультрафиолетового излучения наблюдается накопление его действия, так что суммарный биологический эффект оказывается пропорциональным суммарной плотности энергии излучения.

Излучение видимого диапазона свободно проходит через оптические ткани, глаза (роговицу, хрусталик, стекловидное тело) и фокусируется на поверхности сетчатки. При этом за счет фокусировки плотность потока мощности на сетчатке может быть на 4-5 порядков выше, чем на роговице глаза. Поэтому диапазон видимого света является наиболее опасным для глаз с точки зрения лазерного поражения.

Характер поражения сетчатки глаза сфокусированным лазерным излучением определяется плотностью энергии на поверхности сетчатки. При относительно небольших энергиях лазера наблюдается явление «вспышечной слепоты», когда под действием излучения обезбачиваются (отбеливаются) зрительные пигменты. При этом глаз на некоторое время теряет способность различать предметы.

Поражающее действие излучения видимого диапазона определяется в основном поверхностной плотностью энергии излучения и слабо зависит от длительности воздействия.

При плотности энергии излучения на сетчатке более 2 Дж/см² (при импульсной работе) происходит ожог сетчатки. Пораженный участок имеет при этом вид маленького белого пятна с пигментным ободком: чувствительность пораженного места к свету полностью утрачивается. Клетки сетчатки, как и клетки центральной нервной системы, после повреждения не восстанавливаются. Степень потери зрения глазом зависит от места расположения ожога. Если ожог произошел в периферической части сетчатки, степень потери зрения невелика; при ожоге центральной ямки потеря зрения достигает 70-90%.

Энергия лазерного луча, попадающая в глаз, зависит от мощности лазера, размера лазерного пучка и диаметра зрачка глаза. В зависимости от освещенности окружающих предметов диаметр зрачка изменяется в пределах от 1.6-2 до 7-8 мм. При этом энергия лазерного луча, попадающая в глаз, изменяется в 15-20 раз. Поэтому лазерное излучение представляет большую опасность в затемненных помещениях.

Лазерное излучение ближней части инфракрасного диапазона с длиной волны от 0.8 до 1.4 мкм довольно хорошо проходит через оптическую систему глаза, при этом возможен ожог сетчатки. Поражение глаза излучением этого диапазона имеет такой же характер, как поражение видимым светом, только при несколько больших уровнях мощности, так как коэффициент поглощения излучения сетчаткой глаза уменьшается с ростом длины волны. В диапазоне длин волн 1.3-1.7 мкм начинается интенсивное поглощение излучения тканями, содержащими воду, в том числе роговицей, хрусталиком и жидкостью в передней камере глаза, расположенной между роговицей и хрусталиком. Излучение не доходит до сетчатой оболочки, а поглощается роговицей, хрусталиком и радужной оболочкой. Вследствие наличия пигмента радужная оболочка глаза интенсивно поглощает инфракрасное излучение в диапазоне от 0.8 до 1.7 мкм, особенно в интервале длин волн 0.8-1.3 мкм, где роговица практически прозрачна. Поглощение излучения радужной оболочкой приводит к ее термическому ожогу, который происходит при плотности энергии излучения, превышающей 4 Дж/см². Тепло, выделяющееся при нагревании радужной оболочки, передается соседним тканям, в том числе хрусталику, что приводит к его помутнению. Кроме того, к помутнению хрусталика может привести его нагревание мощным лазерным излучением в диапазоне волн 1.2-1.7 мкм.

Инфракрасное излучение с длиной волны более 1.7 мкм полностью поглощается роговицей и в ткани, расположенные глубже не проникает. Лазерное излучение этого диапазона менее опасно для глаз, оно носит исключительно поверхностный характер.

Для длины волны 10.6 мкм (лазер на углекислом газе) коэффициент поглощения излучения тканями глаза равен 940 см⁻¹. При этом около 70% энергии излучения поглощается слезной жидкостью, остальные 30% полностью поглощаются слоем роговицы толщиной 35 мкм.

Однако инфракрасное излучение большой мощности может вызвать тяжелое поражение роговицы, сопровождающееся денатурацией белков и полной потерей прозрачности (образование бельма). При этом обычно повреждается только тонкий эпителиальный слой, при очень большой дозе облучения может произойти полное разрушение защитного эпителия, помутнение радужной оболочки и хрусталика.

Действие лазерного излучения на кожу и на органы в целом.

Кожа человека поражается лазерным излучением в значительно меньшей степени, чем глаза, тем не менее, поражение кожи встречается достаточно часто, так как кожа является практически незащищенным органом человека. Облучение кожи наблюдается обычно на лице вокруг защитных очков, на внешней поверхности рук, выше линии воротничка, т.е. на тех же поверхностях, которые подвергаются солнечному облучению.

Наиболее сильно действует на кожу излучение ультрафиолетового диапазона. Под действием ультрафиолетового излучения происходит не только нагревание тканей, но также

фотохимические процессы, в частности, распад некоторых молекул, входящих в состав тканей.

Относительно небольшие дозы ультрафиолетового излучения вызывают покраснение кожи (эритемный эффект), исчезающий на следующие сутки. Минимальная эритемная доза облучения составляет для разных людей от 8 до 30 Дж/см².

Максимальный эритемный эффект наблюдается при длине волны излучения 260 нм. Несколько меньшее воздействие оказывают излучения с длиной волны от 270 до 290 нм. Эритемная реакция на излучение с длиной волны более 320 нм невелика, что связано с неспособностью фотонов низкой энергии вызывать фотохимические реакции.

Волны длиной 260-320 нм способны провоцировать появление новообразований, т.е. обладают канцерогенным действием. В практике, однако, не зарегистрировано ни одного случая заболевания раком кожи у людей, занятых длительное время на работах с электро и газосваркой, а также с мощными кварцевыми лампами, являющимися источниками ультрафиолетового излучения с длиной волны 320 нм. Возможно, это связано с повышенной болезненностью ожогов, что вынуждает принимать меры надежной защиты от мощных ультрафиолетовых излучений.

Излучение видимого и инфракрасного диапазонов приводит в основном к нагреванию кожи и может привести к ожогам. Ожоги, вызванные лазерным излучением, имеют резко очерченные границы и напоминают обычные термические ожоги.

Характер воздействия лазерного излучения сильно зависит от степени пигментации кожи. Изменения в пигментированной коже в 10-12 раз превышают изменения непигментированной коже. Это связано с тем, что красящий пигмент - меланин - интенсивно поглощает излучение видимого и ближнего инфракрасного диапазонов.

Кожа человека достаточно хорошо противостоит непрерывному инфракрасному облучению, так как она способна рассеивать тепло благодаря кровообращению и понижать температуру вследствие испарения влаги с поверхности. Импульсное излучение и особенно излучение лазеров в режиме модуляции добротности более опасно для кожи, так как тепло не успевает распространиться в соседние ткани. При этом возникают ожоги с резко очерченными границами, очаги ограниченного омертвления (некроза) ткани, пузырьки, наполненные серозной жидкостью - результат нарушения целостности стенок капилляра.

При воздействии излучения импульсных лазеров с энергией от 3 до 100 Дж на коже возникают кровоизлияния различных размеров, начиная от мелких точечных до довольно обширных диаметром около 20 мм. Если энергия излучения лазера менее 3 Дж, то структурных изменений в коже не наблюдается. А происходит нарушение деятельности ферментов, входящих в состав стенок капилляров. Это понижает антимикробную сопротивляемость кожи и повышает ее чувствительность к другим воздействиям: повышенной температуре, раздражающему действию различных химических реактивов, ухудшает питание кожи.

Нарушение деятельности ферментов в коже может приводить к образованию токсичных веществ, которые, распространяясь по всему организму, ухудшают общее состояние человека, вызывают чувство разбитости, раздражительность, головную боль. Эти неприятные явления могут сохраняться в течение нескольких часов после окончания рабочего дня. У людей, работающих с лазерными установками, обнаружено изменение состава крови, выражающееся уменьшении гемоглобина, тромбоцитов, эритроцитов и лейкоцитов.

При попадании в глаза, кроме органических поражений, лазерное излучение может действовать как стрессор, вызывая различные функциональные нарушения в организме и нарушение нормальной деятельности центральной нервной системы.

Медицинские мероприятия при поражении глаз лазерным излучением.

При случайном поражении глаз лазерным излучением пострадавший должен быть доставлен в медпункт и обследован главным врачом. Характер медицинской помощи при повреждении глаз определяется видом поражения, зависящим от длины волны излучения.

При повреждении ультрафиолетовым следует применять холодные примочки на веки. Примочки делают марлей или чистым носовым платком, смоченный водой. В глаз закапывают 0.25% раствор новокаина.

В случае ожогов век и роговой оболочки необходимо закапывать указанные растворы в глаза и накладывать на веки мази из антибиотиков (5 % левомецетиновую или 10 % сульфаниловую). Эти же мази наносят на поврежденные участки кожи век. На обожженные веки и прилегающие участки лица должна быть наложена повязка. Всем пострадавшим вводят противостолбнячную сыворотку, бицилин или 0.75 грамм левомецетина.

В случае ожога радужной оболочки глаза, вызванного излучением видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра, закапывают в глаза 0.1 % раствор атропина, на поврежденный глаз накладывают антисептическую повязку и пострадавшего срочно направляют к врачу.

Мероприятия при поражении электрическим током.

При поражении электрическим током пострадавшего необходимо быстро освободить от его воздействия. При этом непроизвольное судорожное сокращение мышц руки бывает настолько сильным, что высвободить токопроводящую часть из рук пострадавшего становится почти невозможно. Поэтому необходимо быстро отключить электроустановку с помощью выключателя, рубильника или вывинтить пробки. Если невозможно быстро отключить электроустановку, следует отделить пострадавшего от токопроводящей части. Необходимо иметь в виду, что прикоснувшись к человеку, находящемуся в цепи тока, можно самому попасть под напряжение, поэтому нельзя прикасаться к его телу незащищенными руками. При напряжении до 1000 В пострадавшего отделяют от токопроводящей части сухим канатом, палкой, доской либо одеждой, не проводящей ток. На собственные руки надо надеть диэлектрические перчатки (при их отсутствии изолировать руки суконной фуражкой, шарфом, прорезиненной тканью или сухой материей, встать на изолирующую подставку, сухую доску). Если отделить пострадавшего затруднительно, разрешается перерубить или перерезать провода топором (инструментом) с сухой деревянной рукояткой.

При напряжении выше 1000 В, чтобы освободить пострадавшего от электрического тока, необходимо надеть диэлектрические перчатки и боты и оттягивать пострадавшего штангой или клещами, предназначенными для данного напряжения. Если дыхание и пульс пострадавшего устойчивы, его необходимо удобно уложить, расстегнуть одежду, снять пояс и обеспечить полный покой и доступ свежего воздуха. Следует непрерывно наблюдать за дыханием и пульсом. Рекомендуется дать понюхать нашатырный спирт и обрызгать пострадавшего водой. Если пострадавший не дышит или дышит судорожно с всхлипываниями, необходимо делать ему искусственное дыхание; при отсутствии у пострадавшего пульса одновременно с искусственным дыханием надо проводить закрытый (непрямой) массаж сердца. Во всех случаях немедленно вызывают врача.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются по степени опасности лазеры 0, 1, 2, 3, 4 классов?
2. Перечислите вредные производственные факторы, сопутствующие работе на лазерных установках.

3. Перечислите коллективные и индивидуальные средства защиты от поражения лазерным излучением.
4. Опасность поражения на глаза лазерного излучения различной длины волны.
5. Опасность попадания на кожу лазерного излучения различной длины волны.
6. Оказание доврачебной медицинской помощи при поражении глаз лазерным излучением.
7. Оказание доврачебной медицинской помощи при поражении электрическим током.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2
ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВА, ПРИНЦИПА РАБОТЫ, ТЕХНИКО-
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОТЕЛЬНОГО
ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА С АКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ИЗ
АЛЮМОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА, ЛЕГИРОВАННОГО НЕОДИМОМ
(типа ЛТУ «КВАНТ 15»)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучить конструкцию излучателя и особенности эксплуатации ЛТУ «Квант 15»; получить навыки по эксплуатации ЛТУ «Квант 15».

ОБОРУДОВАНИЕ: ЛТУ «Квант 15», измеритель энергии лазерного излучения ТИИ-1; квантрон, лампа накачки.

Принцип работы лазера на алюмоиттриевом гранате.

В 1961г. по предложению Е. Снитцера был создан лазер, активной средой которого являлось неодимовое стекло (стекло, активированное ионами Nd^{3+}), а в 1964г. по предложению Гейсица - лазер на алюмоиттриевом гранате ($Nd^{3+} : Y_3Al_5O_3$ или $Nd : YAG$ - лазер или ИАГ - лазер), т.е. твердотельной матрицей для активных ионов неодима является алюмоиттриевый гранат.

Лазеры последних двух типов нашли наиболее широкое применение в промышленности в различных технологических процессах. Эти лазеры работают по четырехуровневой схеме (рис.1.). Лазерная генерация возникает при переходе ионов неодима с уровня 3 на уровень 2. Заселение метастабильного уровня 3 достигается благодаря безызлучательным переходам из состояния 4. Уровень 2 обедняется также за счет безызлучательных переходов в основное состояние 1. Важным условием для работы по такой схеме является малая населенность уровня 2 при термодинамическом равновесии системы. Это условие будет выполняться при $E_2 - E_1 > kT$ (k - постоянная Больцмана; T - температура, К).

На практике систему считают четырехуровневой, если $E_2 - E_1 \geq 8kT$. В рассматриваемых типах лазеров достаточно перевести на уровень 3 лишь небольшую часть ионов из основного состояния, тогда как для лазеров, работающих по трехуровневой схеме (например, для рубиновых лазеров), у которых $E_2 - E_1 \leq kT$, для создания инверсной населенности требуется перевести на метастабильный уровень более половины ионов из основного состояния. В связи с этим лазеры, работающие по четырехуровневой схеме, требуют гораздо меньших затрат энергии, чем лазеры, работающие по трехуровневой схеме.

На рис. 1 изображены три основных лазерных перехода для ИАГ - лазера: ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ ($\lambda_{ген} = 946$ нм); ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ($\lambda_{ген} = 1064$ нм); ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ($\lambda_{ген} = 1338$ нм). Самым интенсивным является переход с $\lambda_{ген} = 1064$ нм. Он примерно в 2.5 раза интенсивнее перехода с $\lambda_{ген} = 1338$ нм.

Имея достаточно много полос поглощения в диапазоне длин волн от 500 до 900 нм, ион неодима в матрице из граната обладает в то же время очень узкой линией флуоресценции (~ 1 нм) при времени жизни метастабильного уровня $\sim 200...300$ мкс. Благодаря этому сечение вынужденных переходов в ИАГ достигает $\sim 3 \cdot 10^{-19}$ см². Так как

концентрация активных частиц в гранате также высока ($\geq 10^{20} \text{ см}^{-3}$), то очень высокие коэффициенты усиления на уровне $1...3 \text{ см}^{-1}$ удается получить, возбуждив всего лишь несколько процентов ионов, т.е. при низких уровнях накачки.

ИАГ является твердым изотопным кристаллом. Из него удается изготовить активные элементы в виде стержней с диаметром до 0,5...1 см и длиной до 10 см, отличающиеся высоким оптическим качеством и хорошо поддающиеся полировке. Однако основным преимуществом граната по сравнению со стеклом является его более высокая теплопроводность и способность, выдерживать, не разрушаясь, большие градиенты температур. Именно эти теплофизические свойства вместе с высоким коэффициентом усиления и низкой пороговой энергией возбуждения позволяют осуществить в лазерах с ИАГ не только импульсный, но и импульсно-периодический, а также непрерывный режим генерации.

Так как объем активного элемента из ИАГ ограничен, предельные энергии излучения лазеров на ИАГ в моно импульсе не превышают 1...10 Дж, что существенно ниже, чем у лазеров на стекле. Поэтому обычно лазеры на ИАГ используются в режиме импульсно-периодического или непрерывного возбуждения. При этом в режиме импульсно-периодического возбуждения создают достаточно длинные (0.5...10 мс) импульсы с частотой повторения до 100 Гц, а короткие ($\leq 10 \text{ мкс}$) импульсы с высокой частотой следования до 100 кГц обычно получают при непрерывном возбуждении, модулируя добротность резонатора с помощью расположенного между активным элементом и зеркалом затвором.

Конструктивно ИАГ лазер, как и другие твердотельные лазеры, состоит (рис.2.) из излучателя, блока питания, блока охлаждения и блока управления (при наличии элемента, управляющего режимом генерации). Электрическая энергия от блока питания преобразуется в лампе накачки в световую энергию, часть которой с помощью осветителя фокусируется внутрь активного элемента.

Важной особенностью ИАГ - лазеров является то, что они позволяют получать практически все известные режимы генерации. Режимы генерации классифицируются по пространственным и временным характеристикам излучения или по способу их реализации. В настоящее время в зависимости от характеристик внешнего модулирующего воздействия наиболее часто реализуются следующие основные режимы генерации: модуляции добротности, синхронизации мод, разгрузки резонатора, сдвоенной модуляции, а в отсутствие внешнего модулирующего воздействия - режим свободной генерации. Одномодовые (TEM_{00}) лазеры могут работать во всех временных режимах генерации, а многомодовые (TEM_{nm}) - лишь в двух режимах: свободной генерации и модуляции добротности.

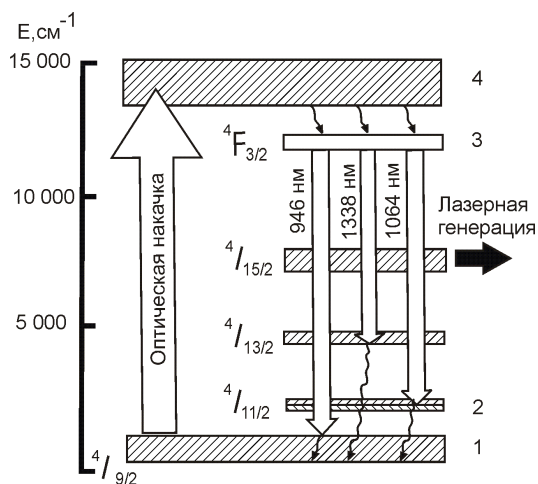


Рис. 1. Схема основных лазерных уровней и переходов ионов Nd^{3+} в YAG-матрице

1 - основной уровень; 2 - нижний лазерный уровень (для основной линии генерации с $\lambda = 1064 \text{ нм}$); 3 - верхний лазерный уровень (метастабильный); 4 - полоса возбуждения (накачки)

Технические данные ЛТУ «Квант 15»

1	Активный элемент	алюмоиттриевый гранат с неодимом
2	Длина волны излучения, мкм	1.06
3	Глубина проплавления, мм	до 0.8-1.2
4	Скорость сварки, мм/мин	до 350
5	Длительность импульса, мс	2.0;2.5;4.0;5.0
6	Частота повторения импульса, Гц	до 10, 20 Гц при $t=2,0$ мс)
7	Рабочий отрезок объектива, мм	50 и 100
8	Диаметр светового пятна, мм	0.3+0.2 – 1.3+0.2
9	Увеличение наблюдательной системы, крат, при объективе $f = 50$	40
10	Энергия импульса излучения, Дж,	не менее 8
11	Потребляемая электрическая мощность, кВт,	не более 12
12	Поле зрения наблюдательной системы (в плоскости обработки), мм	при объективе $f=50$, 3 при объективе $f = 100$, 6
13	Система охлаждения лазера, водяная двухконтурная	внутренний контур заполнен дистиллированной водой при использовании лампы накачки типа ИНПЗ - 7/80 А
14	Расход водопроводной воды в системе охлаждения при давлении 0.06 МПа	не менее 5 л/мин
15	Длина отводного шланга	не должна превышать 3 м
16	Высота подъема отводного шланга	не более 250 мм.
17	Режимы работы	одиночный (с ручным запуском), частотный (запуск от внутреннего генератора с частотой 0.1-10 Гц).
18	Питание установки	от сети трехфазного переменного тока напряжением 220/380 В, частоты 50 Гц.
19	Максимальная потребляемая мощность, кВт	12
20	Габариты установки станка с генератором, мм система СПИК-3	не более 1000x960x1200
21	Габариты системы СПИК-3, мм	не более 720x620x1900
22	Масса установки, кг, станок с генератором	не более: 200
23	Масса системы СПИК- 3, кг	не более: 615

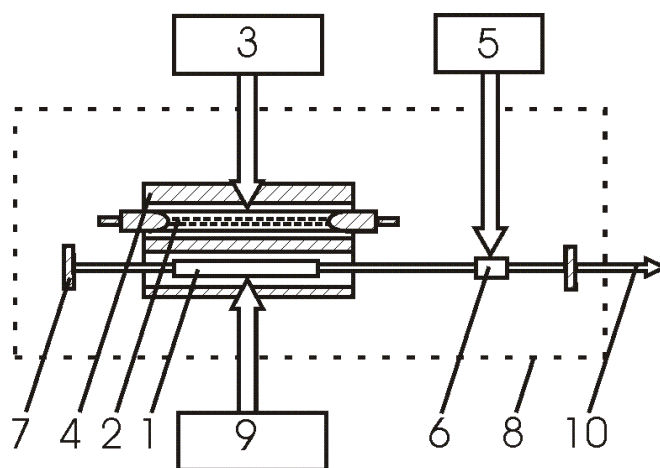


Рис. 2. Типичная схема твердотельного лазера с ламповой накачкой

1 - активный элемент; 2 - лампа накачки; 3 - блок питания; 4 - осветитель; 5 - блок управления; 6 - управляющий элемент; 7 - зеркала резонатора; 8 - излучатель; 9 - блок охлаждения; 10 - выходное излучение

Устройство ЛТУ «Квант 15»

Блок-схема и конструкция станка с генератором представлена на рис. 3. Лазер вырабатывает мощный световой импульс в виде параллельного пучка лучей, который поступает в оптическую систему оптико-механического блока, фокусирующего излучение на поверхность обрабатываемой детали.

Выпрямитель, источник тока и емкостной накопитель энергии служат для электропитания импульсной лампы питания лазера.

Для получения необходимой длительности импульса в разрядной цепи емкостного накопителя установлены катушки индуктивности. Для первоначальной ионизации разрядного промежутка импульсной лампы питания лазера и поддержания его в проводящем состоянии служит блок «поджига» и источник «дежурной дуги» соответственно. Управление моментом начала разряда емкостного накопителя на импульсную лампу и отключение последней на период заряда накопителя производится разрядным коммутатором.

Система охлаждения поддерживает нормальный тепловой режим работы лазера.

Для контроля энергии импульса лазера служит индикатор энергии ИЭ-ЗВА. Свариваемые детали устанавливаются в специальное приспособление.

Для удаления из зоны сварки продуктов горения штуцер 6 рис. 6 подключить к системе вентиляции.

Система управления СУМ - 10А служит для управления источником питания.

Конструкция станка с генератором.

В верхней части станка с генератором (рис. 4 и 5) расположены оптико-механический блок (1), приспособление для полуавтоматической сварки (3), ротаметр (7).

В нижней части станка, закрытой съемными крышками, находятся устройство охлаждения (5), пульт управления установкой (6).

Выносная педаль (9) служит для управления работой лазера в полуавтоматическом режиме.

В нижней части станка находятся кабельные разъемы и три штуцера - два штуцера для подвода водопроводной воды и один - для подвода газа.

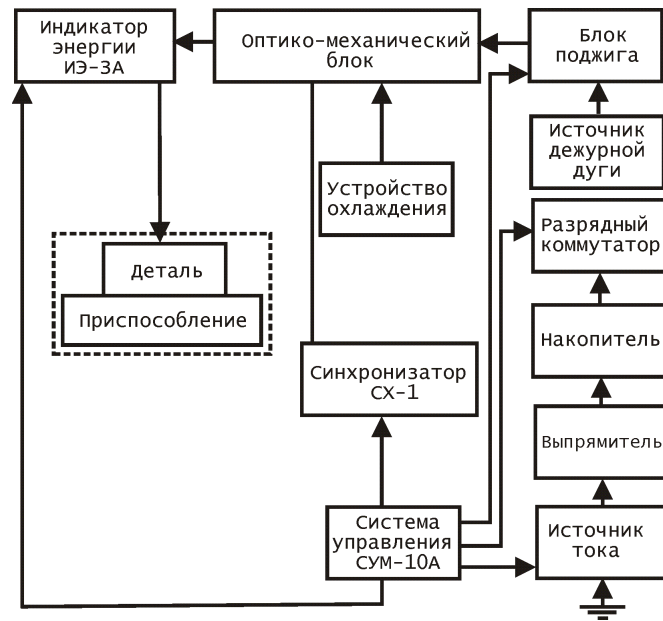


Рис.3 Блок-схема установки

3.2. Устройство оптико-механического блока

Оптико-механический блок (рис. 6) имеет основание (1), на котором установлен лазер (2), механизм перемещения (4), штуцер (6) для удаления продуктов горения из зоны сварки; телескопическую систему, состоящую из положительного (7) и отрицательного компонентов (8); зеркало (9); фокусирующий объектив (10); трубку (11); датчик энергии (12).

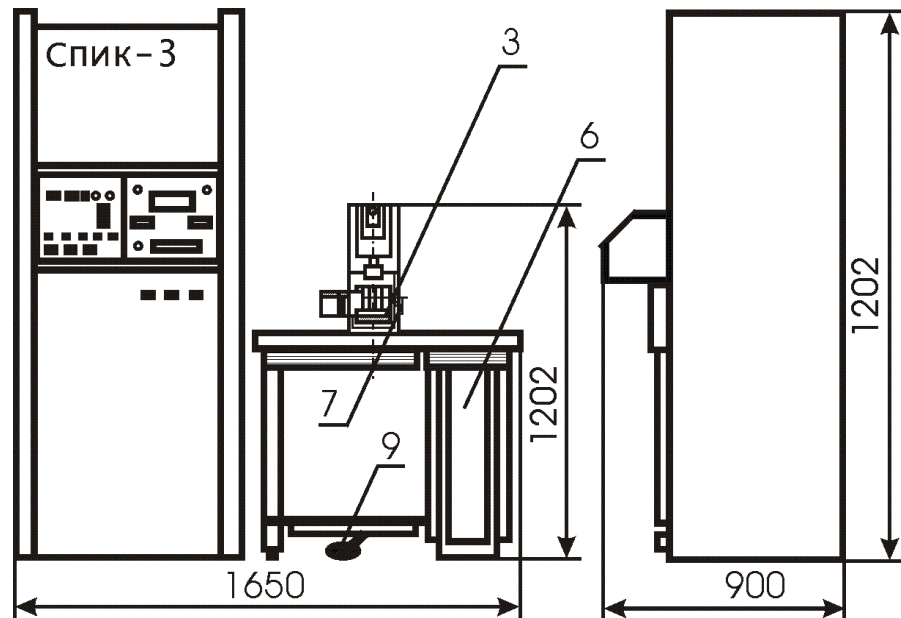


Рис.4. Установка сварки, резки и термообработки

Лазер и оптическая система оптико-механического блока закрыты кожухами. Кожух лазера быстросъемный, крепится четырьмя невыпадающими винтами.

Положительный компонент (7) телескопической системы может перемещаться вдоль оптической оси в пределах 15 мм. Смещение положительного компонента может быть отсчитано по шкале, нанесенной на барабан, часть сектора которого выходит на переднюю панель оптико-механического блока.

Механизм переключения (14) позволяет вводить в энергетический канал отрицательный компонент (2-х или 4-х) телескопической системы поворотом ручки (15). Вращение ручки передается на оправу.

При повороте оправы в энергетический канал вводится двухкратный компонент, либо четырехкратный. В выбранном положении оправа фиксируется пружиной. С помощью насадочных цилиндрических линз (16) формируется пятно эллиптической формы.

Фиксирующий объектив крепится к нижней плоскости оптического блока.

Установка укомплектована двумя фокусирующими объективами $f=100$ мм и $f=50$ мм.

Узел визуального канала крепится к верхней плоскости корпуса. В визуальном канале находится колеблющийся obtюратор, закрывающий канал в момент обработки, и тем самым предохраняет глаза оператора от светового излучения с поверхности обрабатываемой детали.

Лазер конструктивно состоит из двух соосно установленных в одном резонаторе осветителей.

Осветитель (рис. 7) представляет собой герметичный корпус (1), закрытый крышками (3), в котором закреплены активный элемент (4), импульсная лампа накачки (5) и отражатель (6).

Охлаждение лазера осуществляется дистиллированной водой, поступающей от устройства охлаждения в штуцера (7).

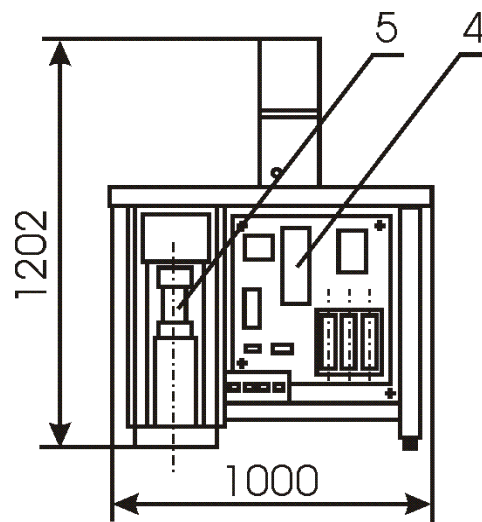


Рис.5. Установка сварки, резки и термообработки (вид сзади)

Все соединения осветителя герметизированы прокладками из вакуумной резины. Осветитель имеет базовую ось (8), параллельную оси активного элемента, подпятник (9), служащий для точной установки осветителя в оптико-механическом блоке.

На основании (1) оптико-механического блока (рис. 6) расположены стойки (3) с зеркалами, одно из которых глухое (5), представляющие собой резонатор лазера. Стойки зеркал имеют одинаковую конструкцию, каждая из них снабжена винтами для юстировки и прижимными устройствами для крепления зеркал.

Указание мер безопасности

К работе на установке допускаются лица:

- 1) сдавшие экзамен По технике безопасности для работы с высоковольтными установками;
- 2) знающие инструкцию, техническое описание и паспортные данные, а также инструкцию по эксплуатации, техническое описание и паспортные данные на входящие

приборы;

3) ознакомленные с распространением излучения лазера в установке.

Установка должна находиться в отдельном помещении, доступ в которое должен быть строго ограничен. Не допускается нахождение посторонних лиц около установки при ее работе.

Недопустимо попадание прямого светового излучения на кожу, особенно в глаза.

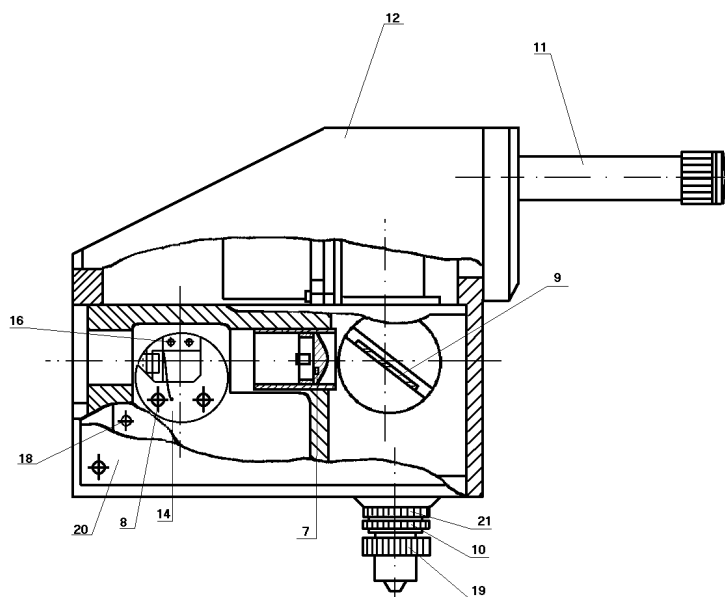
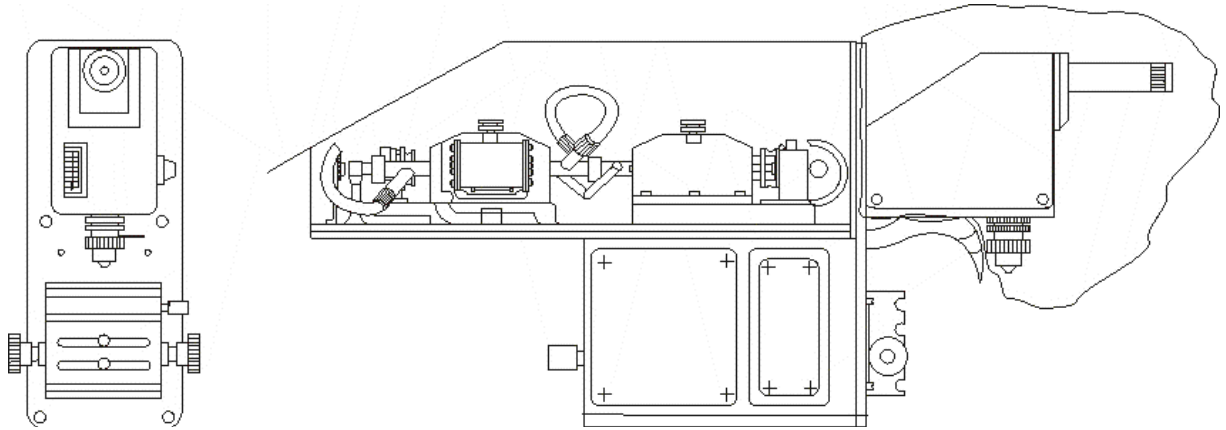


Рис.6. Блок оптико-механический

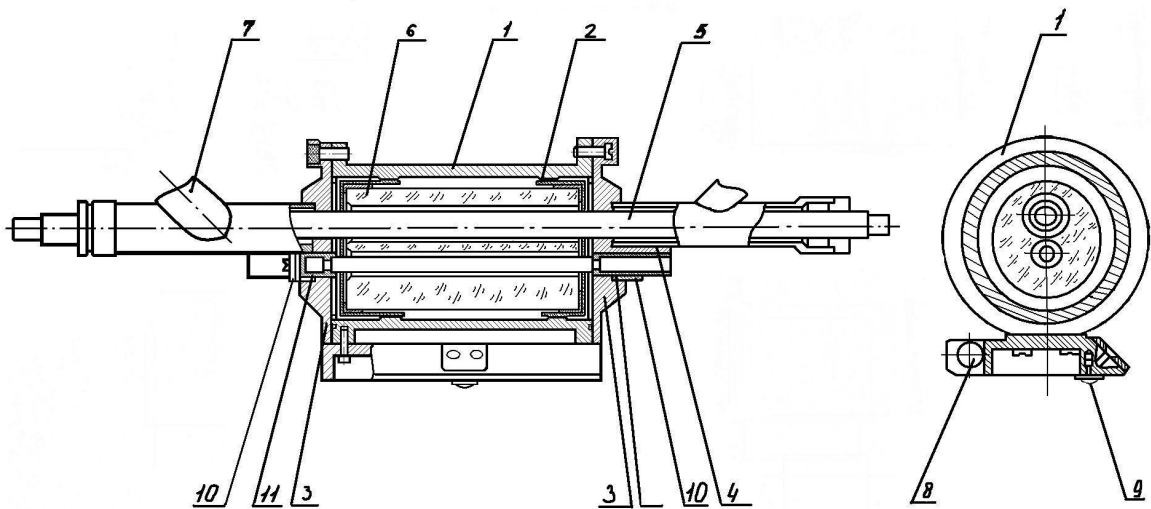


Рис.7. Осветитель

При работе или наладке запрещается выключать блокировку установки.

Запрещается работать на установке со снятыми кожухами.

Шланги подвода не должны иметь перегибов. Течь воды в местах соединений не допускается.

Категорически запрещается работать на установке в режимах, не указанных в паспорте или инструкции по эксплуатации, а также работать при неисправной установке. В случае обнаружения неисправностей немедленно выключить установку и поставить в известность руководителя работ.

Установка должна быть надежно заземлена шиной сечением не менее 25 мм.

Категорически запрещается попадание охлаждающей жидкости на электрические контакты и разъемы.

Порядок работы ЛТУ «Квант 15».

1. Установить все тумблеры и клавиши управления в положение «выключено».
2. Подключить установку к сети трехфазного тока.
3. Открыть водопроводный кран внешнего контура системы охлаждения.
4. Нажать кнопку ВКЛ. на панели пульта управления станком. При этом должен включиться насос системы охлаждения и загорятся лампочки СЕТЬ и ОХЛАЖДЕНИЕ на панели пульта управления станком.
5. Установить автоматический выключатель системы СПИК-3 в нижней задней части в положение ВКЛ. При этом должны работать вентиляторы и гореть лампочки ПИТАНИЕ и РУ на панели СУМ-10А.
6. На СУМ-10А нажать кнопку режима работы СЗ (синхронный запуск), кнопку СУМ

переключателя УПРАВЛЕНИЕ и нажать кнопку XI или XIO.

7 Установить переключатель ЧАСТОТА Hz СУМ-10А в положение 0.

8. Нажать и удерживать кнопку ДЕЖУРНАЯ ДУГА на системе СПИК-3.

9. Неоднократно нажать кнопку ЗАПУСК в СУМ-10А, при этом должна загореться лампа ДЕЖУРНАЯ ДУГА. Отпустить кнопку ДЕЖУРНАЯ ДУГА и ЗАПУСК в СУМ-10А.

10. Нажать кнопку СЧЕТ в СУМ-10А.

11. Нажать кнопку ПИТАНИЕ на панели индикатора энергии ИЭ-ЗА системы СПИК-3, при этом загорается лампочка. Нажатием соответствующей кнопки установить необходимый диапазон измерения.

12. Нажать кнопку ВКЛ.СИЛОВАЯ.

13. Ручкой верньера НАПРЯЖЕНИЕ НАКОПИТЕЛЯ на СУМ-10А установить нужную величину напряжения на накопительных конденсаторах.

14. Нажать кнопку режима работы ЧАСТОТ на пульте управления станка.

15. Нажать кнопку ЗАПУСК на СУМ-10А, при этом произойдет одиночное излучение установки и отклоняется стрелка измерительных приборов на СУМ-10А, индикаторе энергии ИЭ-ЗА и на пульте управления станком.

16. Для работы в частотном режиме кнопками СУМ-10А XI, XIO и переключателем ЧАСТОТА Hz установить необходимую частоту следования импульсов излучения.

17. Для работы с пульта управления станком необходимо ручку верньера НАПРЯЖЕНИЕ НАКОПИТЕЛЯ на СУМ-10А и на пульте управления станком установить в положение «0», нажать кнопку управления ПУЛЬТ СУМ-10А, нажать кнопку режима работы ОДИНОЧ. На пульте управления станком (переключатель ЧАСТОТА Hz СУМ-10А оставить в частотном режиме).

18. Ручкой верньера на пульте управления станком установить нужную величину напряжения на накопительных конденсаторах.

19. Нажать кнопку ЗАПУСК на панели пульта управления станком, при этом происходит одиночное излучение установки, и отклоняются стрелки измерительных приборов на индикаторе энергии ИЭ-ЗА и пульте управления станком.

20. Для выключения установки необходимо:

1)нажать кнопку СТОП ПРИСПОСОБЛЕНИЕ, перекрыть газ;

2)верньер установки напряжения на панели пульта управления станка вывести на «0»;

3)нажать кнопку ОДИНОЧ. режима работы на пульте управления станка;

4)верньер НАПРЯЖЕНИЕ НАКОПИТЕЛЯ на СУМ-10А системы СПИК-3 перевести на «0»;

5)нажать кнопку ВЫКЛ. СИЛОВАЯ системы СПИК-3;

6)поставить автоматический выключатель СПИК-3 в положение ОТКЛ;

7)перекрыть кран внешнего контура охлаждения установки и вывести остальные кнопки и ручки в исходное положение

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1.Изучить принципы работы лазера на алюмо-иттриевом гранате.

2.Изучить технические данные ЛТУ «Квант 15».

3.Изучить устройство ЛТУ «Квант 15».

3.1.Зарисовать блок-схему ЛТУ «Квант 15» в журнал и ознакомиться с функциональным предназначением отдельных блоков.

3.2.Снять кожух с оптико-механического блока, изучить конструкцию и функциональное предназначение отдельных его элементов. Зарисовать в журнал оптический тракт ЛТУ «Квант 15» с указанием хода лазерного излучения и узла визуального канала.

3.3.Определить место расположения и ознакомиться с конструкцией резонатора и зеркал резонатора квантрона, активного элемента, лампы накачки, датчика энергии.

3.4. Изучить устройство телескопической системы и предназначение положительных и отрицательных компонентов.

3.5. Закрыть все защитные кожухи.

4. Эксплуатация ЛТУ «Квант 15».

4. 1. Изучить меры безопасности при эксплуатации ЛТУ «Квант 15» (п.4).

4. 2. Изучить порядок работы установки (п.5) (Обратить внимание на заземление установки).

4. 3. Подготовить установку к работе и произвести запуск согласно п.5.

Провести обработку поверхности мишени в моноимпульсном режиме при напряжении накопителя 500 В.

4. 4. Произвести обработку поверхности мишени в частотном режиме при напряжении накопителя 500 В, частоте 5 Гц (или других значениях по заданию преподавателя) в течение 17 сек. Пользуясь показаниями счетчика определить число импульсов излучения воздействовавших на поверхность за указанное время.

5. Получить технологические отверстия с различными параметрами в полученном от преподавателя материале.

6. Построить график зависимости диаметр отверстия энергия в импульсе.

7. объяснить полученную зависимость

8. Выключить установку.

9. Ответить на контрольные вопросы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Преимущества и недостатки ИАГ - лазера по сравнению с рубиновым лазером и лазером на стекле с неодимом.
2. Способы накачки ИАГ - лазеров.
3. Основные конструктивные элементы ИАГ - лазера.
4. Предназначение и основные конструктивные элементы визуального контроля (СОК 1).
5. Устройство резонатора ЛТУ «Квант 15».
6. Основные блоки ЛТУ «Квант 15».
7. Технические данные ЛТУ «Квант 15».

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические лазеры: Справочник: В 2 т. Т.1: Расчет, проектирование и эксплуатация /Г.А. Абильситов, В.С. Голубев, В.Г. Гонтарь и др.; Под общ. ред. Г.А. Абильситова. - М.: Машиностроение, 1991. - 432 с.
2. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. I. Физические основы технологических лазеров: Учеб. пособие для вузов. / В.С. Голубев, Ф.В. Лебедев; Под ред. А.Г. Григорьянца. - М.: Высш. шк., 1987. - 191 с.
3. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ЛТУ «Квант 15».

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВА, ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОТЕЛЬНОГО НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРА С АКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ИЗ АЛЮМОИТТРИЕВОГО ГРАНАТА, ЛЕГИРОВАННОГО НЕОДИМОМ (ТИПА ЛТН- 103)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучить конструкцию, технико-эксплуатационные параметры и характеристики и особенности эксплуатации ЛТН-103;

Оборудование: ЛТН-103, измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н.

Основные технические данные и характеристики.

Лазер ЛТН-103 — твердотельный лазер непрерывного режима, работающий на длине волны лазерного излучения 1064,1 нм, предназначен для работы в технологических и других установках

Питание лазера осуществляется от трехфазной сети переменного тока напряжением 380 В, частотой 50 Гц.

В лазере применена двухконтурная система охлаждения, во внешний контур которой подается циркуляционная (водопроводная) вода при давлении не менее 0,06 МПа, а во внутренний - заливается вода ГОСТ 6709-72, расход воды не менее 20 л/мин при сливе через квантрон излучателя. Расход циркуляционной (водопроводной) воды не менее 10 л/мин.

Производительность внутреннего контура системы охлаждения лазера не менее 20 л/мин.

Система блокировки лазера обеспечивает отключение лазера при уменьшении производительности внутреннего и внешнего контуров системы охлаждения: внутреннего не менее 18л/мин, внешнего — не менее 4,5 л/мин.

Максимальная электрическая мощность, потребляемая лазером не более 16 кВт.

Показатели надежности лазера при доверительной вероятности $P^*=0,8$ следующие:
Наработка на отказ не менее 200 ч.
Средний ресурс не менее 1000 ч.

Основные энергетические и пространственные параметры лазера:

- Длина волны лазерного излучения, нм 1064.1
- Мощность лазерного излучения, Вт 250±25
- Ток накачки, А не более 37
- Энергетическая расходимость лазерного излучения 0.5 мощности, мрад не более 14
- Нестабильность мощности лазерного излучения в течение 8 ч непрерывной работы, % не более 2

- Класс лазерной опасности III

Время готовности лазера не более 15 мин

Время непрерывной работы не более 8 ч

Суточная наработка не менее 18 ч при циклическом режиме : 8 ч непрерывной работы и 45 мин перерыв

Сопротивление изоляции электрических цепей сетевого питания лазера между собой не менее 200 МОм; сопротивление цепей относительно корпуса не менее 20 МОм

Сопротивление изоляции между высоковольтным кабелем лазера и корпусом излучателя не менее 1000 МОм

Электрическое сопротивление между ботом защитного заземления лазера и корпусом квантрона лазера не более 0.1 Ом

Максимальная электрическая мощность, потребляемая лазером, не более 16 кВА

Удельная эксплуатационная энергоемкость не более 0,072 кВА/Вт

Конструкция лазера предусматривает дежурный режим работы лампы накачки излучателя с пониженным током накачки 10 А, при этом излучение лазера отсутствует

Устройство и работа лазера

В основе работы лазера лежит принцип индуцированного (вынужденного, стимулированного) лазерного излучения, получаемого путем оптической накачки газоразрядной лампой активной среды лазера.

Конструктивно лазер выполнен в виде двух устройств: излучателя 1, системы питания, испытания и контроля работы излучателя СПИК-2 (далее — системы СПИК-2) 2 (рис.1).

Важнейшей составной частью лазера является излучатель, в резонаторе которого происходит преобразование электрической энергии, поступающей от системы СПИК-2 в энергию лазерного излучения.

Большая часть подводимой к квантрон излучателя электрической энергии (~10 кВт) выделяется в виде тепла, которое снимается и направляется в систему слива устройством охлаждения системы СПИК-2.

Относительная величина мощности лазерного излучения лазера контролируется с помощью индикатора мощности системы СПИК-2, электрический на который подается после преобразования части лазерного излучения с фотоприемного устройства излучателя.

Подключают систему СПИК - 2 к сети переменного тока предварительно нажав кнопку ВЫКЛ автоматического переключателя СЕТЬ.

Питание на лампу накачки подается от блока питания БП-10-40 системы СПИК-2. блок зажигания служит для первичного пробоя лампы.

Время наработки лазера фиксируется счетчиком ВРЕМЯ НАРАБОТКИ.

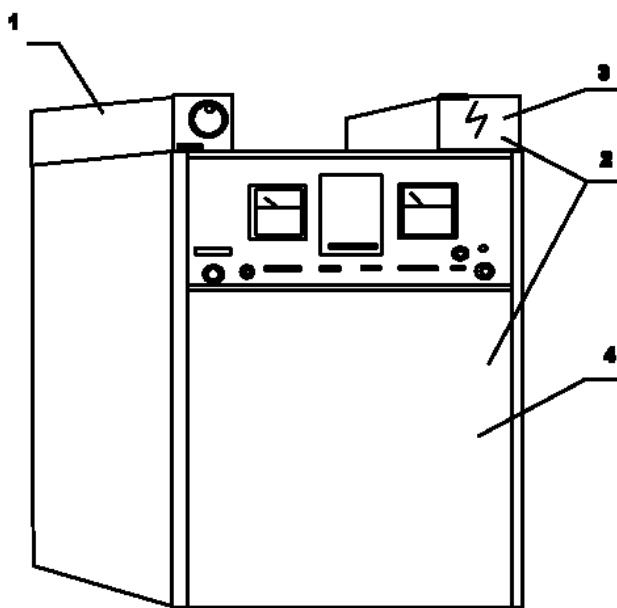


Рис.1. Устройство ЛТН-103

1 – Излучатель; 2 - Система СПИК – 2; 3 – Блок зажигания; 4 – Стойка питания и охлаждения.

При испытании, монтаже, эксплуатации и всех видах технического обслуживания могут возникнуть следующие виды опасности: электороопасность, лазерная опасность, взрывоопасность, пожароопасность.

Источниками электороопасности являются: электрические цепи и выходные контакты элементов электрических цепей, находящиеся внутри БП-10-40 и блока зажигания источника; цепи питания лампы накачки, электромагнитной заслонки и микровыключателя системы блокировки излучателя лазера.

Источником лазерной опасности является излучатель лазера. Класс лазерной опасности III. Предельно допустимые уровни лазерного излучения: для глаз — $2,7 \cdot 10^{-4}$ Дж·см⁻²; для кожи — $4 \cdot 10^4$ Дж·см⁻².

Для предотвращения поражения лазерным излучением при случайном включении лазера внутри излучателя имеется электромеханическая заслонка, перекрывающая резонатор при отсутствии на ней напряжения.

Работа персонала с лазерным излучением производится в защитных очках со светофильтрами СЗС-22 на длине волны 1064.1 нм.

Источником взрывоопасности является лампа накачки КДНП 6/90А-1 квантрона излучателя (давление внутри баллона лампы ~0,2 МПа).

Источником пожароопасности является спирт ректифицированный, применяемый для смачивания бязи или медицинской ваты при чистке элементов излучателя в ходе проведения профилактического обслуживания.

Устройство излучателя

Конструкция излучателя лазера приведена на рис.2.

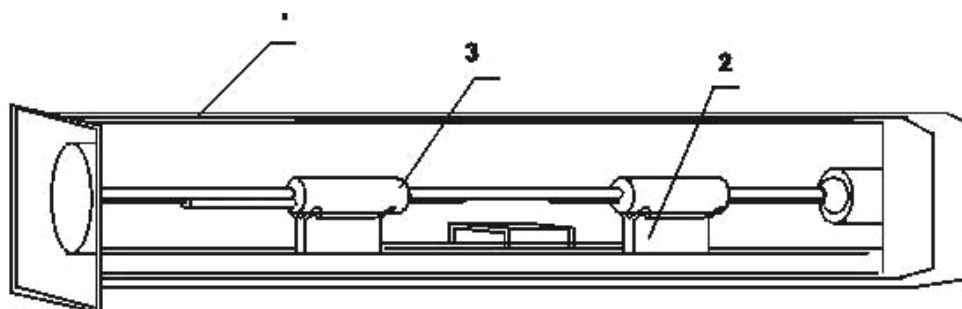


Рис.2. Конструкция излучателя
1 - Корпус; 2 – Столик; 3- Квантрон.

Излучатель состоит из: устройства приемного; резонатора, состоящего из двух зеркал; двух квантронов К-301В; электромеханической заслонки; кронштейна с микровыключателем системы блокировки излучателя. В центральной части корпуса 1 установлены 2 столика 2, на которых закреплены квантроны 3. для поджатия квантрона к юстировочным болтам служит дисковая гайка 8. конструкция квантрона приведена на рис.3.

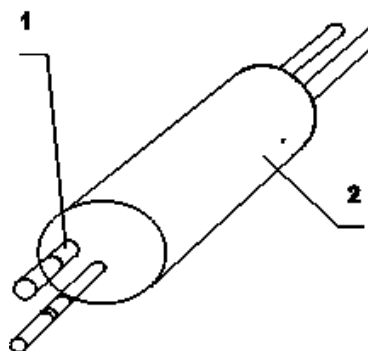


Рис.3. Конструкция квантрона
1- Активный элемент; 2 – Отражатель.

Основной частью является корпус 7 в виде цилиндра с примыкающими к нему по торцам корпусами 8. корпуса 8 со стороны, соединяемой с корпусом 7, имеют кольцевую канавку для размещения уплотняющих колец 6, два глухих отверстия 5 для размещения фторопластового кольца.

Внутри корпусов 7, 8 находится отражатель 2, представляющий собой моноблок из легированного кварцевого стекла в форме эллиптического цилиндра.

Для размещения активного элемента и лампы накачки по фокальным плоскостям эллипса просверлены два отверстия диаметрами 8 мм (для элемента) и 12 мм (для лампы накачки).

Активный элемент, выполненный в виде круглого стержня диаметром 6,3 мм и длиной 100 мм, изготовлен из монокристалла алюмоиттриевого граната, активированного трехвалентными ионами неодима (АИГ).

Накачка активного элемента осуществляется дуговой лампой непрерывного горения с криптоновым наполнением КДНП 6/90А-1.

Резонатор излучателя образован двумя зеркалами с многослойными диэлектрическими отражающими покрытиями.

Выходное зеркало имеет коэффициент пропускания 23 ± 3 %, «глухое» зеркало — не менее 0,2%.

Основу зеркал составляют подложки, имеющие вид шайбы диаметром 40 мм, толщиной 10 мм, изготовленные из стекла КУ-1 и КВ.

Глухое зеркало устанавливается в держателе.

Изменение положения поверхности зеркала относительно оси излучения (юстировку можно осуществлять путем поворота юстировочных винтов). Необходимо учитывать, что юстировка зеркала в одной плоскости осуществляется попеременным вращением двух винтов. В торец держателя ввертывается устройство приемное. Устройство приемное состоит из корпуса, фотодиода ФД-24К и светофильтров. Выходное зеркало не юстируется.

Оси зеркал смещены относительно оси излучения на 10 мм, что позволяет путем поворота зеркала вокруг оси симметрии производить замену отражающей поверхности, т.е. многократно использовать зеркало в случае порчи отражающей поверхности.

В качестве дополнительных мер безопасности при работе лазера в составе технологических установок внутри резонатора излучателя на пути луча устанавливается электромеханическая заслонка, которая открывается после поджига лампы, что исключает разрушение активного элемента при броске мощности накачки в момент пробоя лампы.

Порядок включения лазера.

1. Откройте кран водопроводной магистрали и убедитесь в прохождении водопроводной воды в систему слива.
2. Переведите автоматический переключатель СЕТЬ в положение ВКЛ, должны загореться три индикаторные лампы СЕТЬ.
3. Вставьте ключ в замок переключателя ПИТАНИЕ и поверните его по часовой стрелке до упора.
4. Нажмите кнопку ВКЛ СИЛОВАЯ, должна загореться индикаторная лампа СИЛОВАЯ. При отсутствии воды должна загореться индикаторная лампа АВАРИЯ. В этом случае переведите автоматический переключатель СЕТЬ в положение ВЫКЛ и устраните неисправность.
5. Нажмите кнопку ПОДЖИГ и убедитесь, что в лампах происходит пробой. **ВНИМАНИЕ!** Перед нажатием кнопки ПОДЖИГ убедитесь в отключении заслонки от системвСПИК-2 (кнопка ЗАСЛОНКА не нажата).
6. Поверните ручку потенциометра ТОК влево до упора.
7. Нажмите кнопку ПУСК. Вольтметр на лицевой панели должен показывать напряжение холостого хода.
8. Кратковременно нажмите кнопку ПОДЖИГ. Должны зажечься лампы накачки. Амперметр покажет минимальный ток 10А.
9. Нажмите кнопку ЗАСЛОНКА.

10. Установите по амперметру требуемое значение тока поворотом ручки потенциометра ТОК вправо.
11. Проверьте с помощью визуализатора наличие на выходе излучателя лазерного излучения.
12. Нажмите кнопку СЕТЬ ИМ. Должна загореться индикаторная лампа СЕТЬ ИМ. Для работы с индикатором мощности необходимо оставить его включенным на 10 мин для прогрева.
13. Произведите установку нуля стрелки микроамперметра УСТАН.0 на любом из трех диапазонов: $\times 1$, $\times 3$, $\times 10$.

С помощью потенциометра КАЛИБРОВКА при наличии лазерного излучения с известным уровнем мощности установите стрелку индикатора мощности на требуемое деление для выбора цены деления прибора, удобной для отсчета уровня мощности.

Порядок выключения лазера

1. Нажмите кнопку СЕТЬ ИМ, должна погаснуть индикаторная лампа СЕТЬ ИМ. Нажмите кнопку ЗАСЛОНКА.
2. Поверните ручку потенциометра ТОК влево до упора.
3. Нажмите кнопку СТОП.
4. Нажмите кнопку ВЫКЛ. СИЛОВАЯ, должна погаснуть индикаторная лампа СИЛОВАЯ.
5. Поверните ключ в замке переключателя ПИТАНИЕ против часовой стрелки до упора.
6. Переведите автоматический переключатель СЕТЬ в положение ВЫКЛ, должны погаснуть три индикаторные лампы.
7. Отключите систему СПИК -2 от трехфазной сети переменного тока напряжением 380 В, частоты 50 Гц.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с технико-эксплуатационными параметрами и характеристиками ЛТН 103.
2. Изучить устройства ЛТН 103 и ознакомиться с возможными опасностями при его эксплуатации.
3. Снять защитные кожухи с излучателя. Изучить устройство. Зарисовать в журнал оптическую схему излучателя.
4. Изучить возможность юстировки излучателя. Закрыть защитные кожухи.
5. Изучить порядок включения – выключения ЛТН 103.
6. Исследование технико-эксплуатационных характеристик ЛТН 103.
 - 6.1. Подготовить установку к работе и провести запуск.
 - 6.2. Исследовать нестабильность выходной мощности за первые 30 мин работы ЛТН 103.
 - 6.3. Используя индикатор мощности СПИК -2 и измеритель мощности ИМО-2Н, исследовать зависимость выходной мощности $P_{\text{ИМО}}$ и $P_{\text{ИМ}}$ от тока накачки I (выше 37 А не поднимать!). определить $I_{\text{порог}}$, ниже которого генерация отсутствует.

ВНИМАНИЕ! Мощность непрерывного лазерного излучения, измеряемая прибором ИМО-2Н, не должна превышать 100 Вт!

- 6.4. Выключить установку.
- 6.5. Построить графики: $P_{\text{ИМО}} = f(I)$, в том числе и для дежурного режима, $\Delta P/P = f(t)$, калибровочную кривую для индикатора мощности $P_{\text{ИМ}} = f(I)$, где $P_{\text{ИМ}}$ в делениях шкалы индикатора мощности.

- Проанализировать графики и сделать **ВЫВОДЫ**.
7. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Перечислить технические данные ЛТН 103.
2. Устройство ЛТН 103.
3. Предназначение блока зажигания.
4. Виды и источники опасности при эксплуатации ЛТН 103.
5. Устройство излучателя ЛТН 103 и его отличия от излучателя КВАНТ-15 .
6. Как осуществляется юстировка резонатора? Можно ли юстировать выходное или «глухое» зеркало?
7. Устройство системы охлаждения. Чем вызваны жесткие требования по расходу хладагента?
8. Предназначение дежурного режима. Начинается ли генерация лазерного излучения при нажатии кнопки «ПОЖИГ»?
9. Предназначение электромеханической заслонки.
10. Возможные причины разрушения квантронов.
11. Опасно ли попадание пузырьков воздуха во внутренний контур охлаждения?
12. Почему нельзя увеличивать ток накачки ЛТН 103 выше 37 А?
13. Как измерить мощность лазерного излучения, пользуясь индикатором мощности СПИК-2?
14. Перечислите возможные пути повышения выходной мощности установки ЛТН 103.
15. Пользуясь своими экспериментальными данными, укажите диапазон регулируемой мощности лазерного излучения ЛТН 103. Каким образом можно плавно изменять мощность лазерного излучения ЛТН 103 от 0 до 250 Вт?
16. Преимущества и недостатки ЛТН 103 в сравнении с CO₂ – лазерами непрерывного действия.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВА, ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРА (ТИПА ШАТЛ)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучить конструкцию, технико-эксплуатационные параметры и характеристики и особенности эксплуатации ЛГН-111;
Оборудование: ЛГН-103.

Устройство аппарата

Внешний вид аппарата представлен на рис. 1. В состав аппарата входят: стойка крепления лазера (1), газовый лазер ЛГН-111 (2), источник питания лазера (3), блок управления (4), узел ввода лазерного излучения (6), волоконный световод (7), оконочный манипулятор (8), сменный наконечник (9). Вертикальное расположение излучателя лазера ЛГН-111 и снабжение стойки колесиками делает аппарат мобильным и одновременно позволяет сократить его габаритные размеры.

Конструктивно аппарат выполнен таким образом, что излучение лазера посредством узла ввода согласовывается с волоконным световодом. В аппарате используется кварц -

полимерный волоконный световод (ВС) типа КП-400 с наружным диаметром 1.2 мм и длиной 3 м. Использование данного световода позволяет эффективно и без потерь передавать излучение. На конце волоконного световода устанавливается оконечный манипулятор, который позволяет подводить излучение непосредственно к объекту воздействия. На рис.2 представлена схема манипулятора. В состав манипулятора входят соответственно: манипулятор (1) заданной формы, с заданной длиной и диаметром поперечного сечения, сменный наконечник (2), ручка (3) с возможностью фиксации собственно манипулятора и световода. Манипуляторы и сменные наконечники выполнены из материалов устойчивых любой обработке, включая стерилизацию и автоклавирование.

Передняя панель блока управления представлена на рис.3. Аппарат может работать в трех режимах: в непрерывном режиме, в режиме с автоматическим отключением лазерного излучения и в режиме автоматической подачи звукового сигнала по окончании заданного интервала времени в диапазоне от 1 до 9999 с. Для работы в непрерывном режиме необходимо клавишу выбора режима на блоке управления перевести в левое положение «*». Переход в режим автоматического отключения осуществляется путем перевода этой клавиши в среднее положение «0». Режим подачи звукового сигнала обеспечивается в правом положении переключателя режимов.

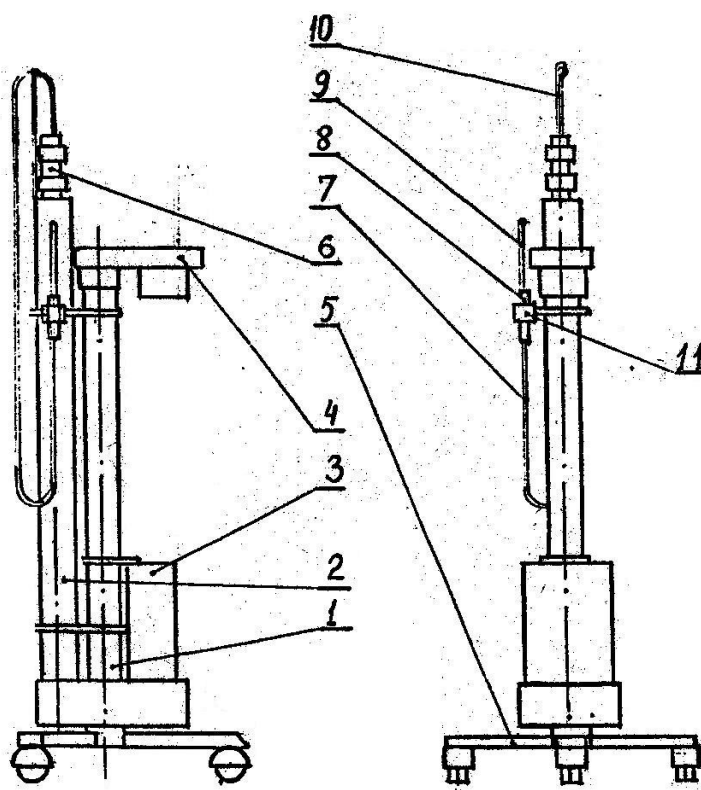


Рис.1. Внешний вид аппарата

1 – стойка крепления лазера; 2 – излучатель лазера; 3 – источник питания лазера; 4 – блок управления; 5 – каретка аппарата; 6 – узел ввода лазерного излучения; 7 – волоконный световод; 8 – оконечный манипулятор; 9 – сменный наконечник с микролинзой; 10 – держатель волоконного световода; 11 – держатель манипулятора.

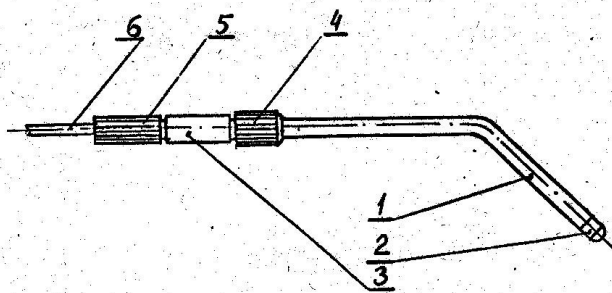


Рис. 2. Схема манипулятора

1 – манипулятор; 2 – наконечник с микролинзой; 3 – ручка манипулятора; 4 – гайка фиксации световода; 5 – гайка фиксации световода; 6 – световод

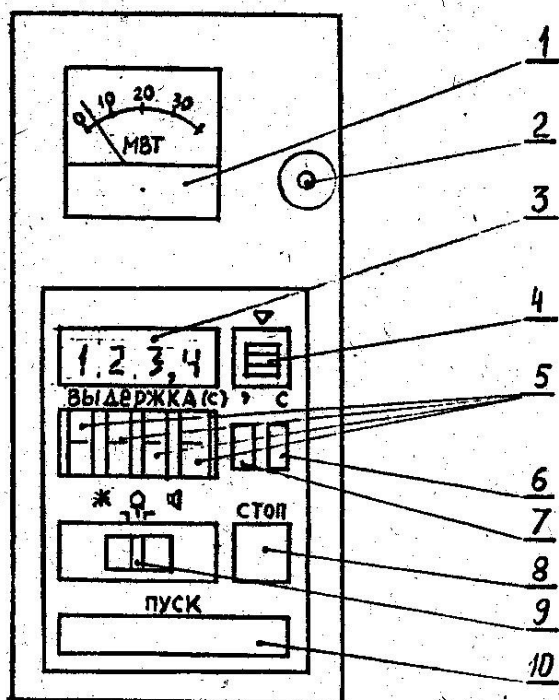


Рис.3. Блок управления

1 – стрелочный индикатор измерителя мощности лазерного излучения; 2 – приемная площадка измерителя мощности лазерного излучения; 3 – цифровой индикатор времени облучения; 4 – выключатель питания; 5 – клавиша набора времени облучения «выдержки»; 6 – клавиша сброса выдержки «с»; 7 – клавиша установки запятой «.»; 8 – клавиша остановки облучения «СТОП»; 9 – переключатель режимов работы; 10 – клавиша «ПУСК».

Контроль мощности излучения осуществляется при помощи измерителя мощности. Для этого необходимо в центр приемной площадки направить луч лазера. Показания стрелочного прибора соответствуют мощности излучения в мВт.

Измерение параметров лазерного излучения и определение дозы воздействия

При использовании лазерного излучения необходимо знание его основных параметров. Основными характеристиками лазерного излучения являются следующие: мощность излучения, плотность мощности излучения, энергия облучения или доза воздействия, плотность энергии облучения.

Мощность. Выходная мощность излучения непрерывных лазеров P измеряется в ваттах (Вт) или милливаттах (мВт, $1 \text{ Вт} = 1000 \text{ мВт}$). Выходная мощность непрерывного излучения «Шатл» определяется с помощью специального калибровочного измерителя со строчной индикацией, для чего к измерительному окну прибора следует подвести выходной наконечник манипулятора и зарегистрировать отклонение стрелки индикатора. Прибор откалиброван в милливаттах.

Плотность мощности. Для характеристики мощности лазерного излучения, приходящейся на единицу поверхности ткани определяют параметр, который называется плотностью мощности излучения – w и измеряется в мВт/см² или Вт/см². Для определения этого параметра сначала следует определить площадь поверхности светового пятна – S , которым осуществляется облучение и разделить на полученное значение мощность P :

$$W = P/S \quad (1)$$

Диаметр светового пятна можно определить с помощью набора маркированных кругов, вырезанной из белой бумаги и помещенных на пути луча, перпендикулярно его оси

Механизм терапевтического действия низкоинтенсивного лазерного излучения

В основе биостимулирующего действия низко интенсивного лазерного излучения лежат структурно – функциональные перестройки мембранных образований клеток и внутриклеточных органелл. Это может быть обусловлено как резонансным поглощением специфическим акцептором в соответствующей области спектра, так и возникновением колебательно-возбужденных состояний, что приводит к изменению уровня перекисного окисления липидов и конформации локальных участков мембраны в целом. В результате создается физико-химическая основа для последовательного формирования неспецифических реакций клеток: изменение ионной проницаемости, активности оденилатциклазной и АТФ-азной систем, что в свою очередь приводит к усилению биосинтетических процессов. Весь этот комплекс изменений на уровне клетки способствует развитию восстановительных реакций в соответствующих тканях, повышению их функциональных возможностей и резистентности организма в целом.

Для практического врача в клиническом аспекте основными эффектами, достигаемыми непосредственно в патологически измененных тканях под действием низкоинтенсивного лазерного излучения и которые могут быть объективно зарегистрированы с помощью диагностического аппаратуры являются:

- активация метаболических процессов;
- ускорение регенераторных процессов;
- ускорение микроциркуляции тканей.

Способность низкоинтенсивного лазерного излучения активировать процессы метаболизма клеток и тканей в наибольшей степени проявляется в условиях патологии. Ускорение регенераторного процесса под влиянием лазерного воздействия в целом складывается из уменьшения длительности фаз воспаления и интенсификации восстановительных механизмов. Происходит изменение временных параметров процесса, составляющих эти фазы: сосудистой и макрофагальной реакции, формирования грануляционной ткани, созревания соединительной ткани, восстановления органоспецифичности.

Воздействие лазерного излучения на поврежденную ткань приводит к уменьшению интерстициального и внутриклеточного отека, что связано с повышением кровотока в

тканях, активацией транспорта веществ через сосудистую стенку, а также с интенсивным формированием сосудов, особенно капилляров. Уменьшение отека и тканевого напряжения в пораженной ткани сопровождается ослаблением болевого синдрома.

Основные свойства лазерного луча

1. Распространение лучей в пространстве в виде параллельных волн.
2. Монохроматичность, т.е. наличие в спектре излучения только одной длины волны.
3. Когерентность – выход лучей с одинаковыми знаками колебаний.
4. Способность к фокусировке.

Общие принципы и методика облучения лазером

Используются три разновидности местных методик:

1. Облучение патологического очага.
2. Облучение рефлексогенных зон.
3. Облучение точек акупунктуры.

Для лечения заболеваний крупных суставов и мышц, а также заболеваний позвоночника, ведущим клинически проявлением которых является воспалительно – болевой компонент целесообразно использовать одновременно с лазерным воздействием скользящий баночный массаж (лазерный баромассажер). Для усиления системного воздействия лазерного облучения при ряде заболеваний применяется внутривенное лазерное облучение крови.

Язвенную болезнь желудка, двенадцатиперстной кишки, хронический гастрит можно лечить, вводя лазерный световод через эндоскопическую аппаратуру. Этот же принцип используется и при лечении некоторых заболеваний легких.

Лечение необходимо проводить натощак. Сразу после процедуры не есть, лучше через 30-40 минут.

Лазерная терапия повышает действие лекарств, особенно антибиотиков; оказывает легкий седативный эффект. Время одного сеанса не более одного часа, на рекомендуется использовать и более 5 точек.

Повторные курсы можно осуществлять с интервалом 1.5-3 месяца. В год возможно проведение 4 курсов лазеротерапии.

Нежелательно совмещать в один день- исследование и лазеротерапию.

Общая продолжительность первой процедуры при выходной мощности излучения 15-20 мВт колеблется от 5 до 8 минут с последующим увеличением экспозиции до 10-15 минут. Курс лечения 5-10 процедур.

Противопоказания к применению низкоинтенсивной лазерной терапии

Противопоказания к применению низкоинтенсивной лазерной терапии определяются исходя из общих противопоказаний к применению физиотерапевтических светолечебных средств, предусмотренных Правилами работы со светолечебными физиотерапевтическими приборами, с учетом ряда особенностей лазерного излучения:

1. Тяжело протекающие заболевания сердечно-сосудистой системы:
 - нарушения сердечного ритма;
 - атеросклеротический кардиосклероз с выраженным нарушением мозгового кровообращения;
 - аневризма аорты;
 - недостаточность кровообращения 2 степени.
2. Заболевания нервной системы с резко повышенной возбудимостью.

3. Заболевания крови.
4. Гипертиреоз.
5. Выраженная и тяжелая степень эмфиземы легких.
6. Туберкулез легких, туберкулезная интоксикация.
7. Функциональная недостаточность почек.
8. Злокачественные опухоли.
9. Тяжелая степень сахарного диабета.
10. Повышенная чувствительность к световому излучению

Основные меры предосторожности при работе с аппаратом

При эксплуатации и ремонте аппарата могут возникнуть следующие виды опасности:

- электроопасность,
- лазерное облучение (прямое, зеркальное и диффузно-отраженное).

Источники электроопасности:

- переменное напряжение 220 В в цепях питания блока управления и источника питания лазера.
- напряжение до 15 кВ в цепях питания излучателя лазера.

Для предупреждения травм электрическим током излучатель и блок питания во время работы лазерной установки вскрывать категорически запрещается.

Техническое обслуживание, ремонтные работы производятся только после отключения аппарата от сети.

По требованиям электробезопасности аппарат выполнен по классу защиты I и типу ГОСТ 12.2.025-76.

В аппарате применяются лазеры ЛГН-111, по степени генерируемого излучения относящиеся к 3 классу в соответствии с ГОСТ 12.1.040-83.

ВНИМАНИЕ!

Для предотвращения травмы глаз не следует направлять лазерное излучение непосредственно в глаза и на бликующие поверхности окружающих предметов.

Запрещается при работе с аппаратом направлять лазерное излучение на окна, двери, стены и т. п., вносить в зону луча предметы, способные вызывать отражение или рассеяние в окружающее пространство, смотреть навстречу или в направлении луча, работать с неисправной аппаратурой и без защитных очков.

Работа с лазерами должна проводиться в помещениях с ярким общим освещением, чтобы зрачки глаз были сужены; это ограничивает воздействие лазерного луча на сетчатку глаза при случайном освещении глаз как первичным, так и зеркально-отраженным лучом (от гладких стен, стеклянных шкафов, приборов, и т.п.).

Стены помещения, должны быть выкрашены в темные тона, что бы уменьшить рассеивание лазерного света. На двери помещения должно быть не входить, лазерное излучение.

К работе с аппаратом допускаются лица, достигшие 18 лет, имеющие 1 квалификационную группу по технике безопасности, изучившие настоящий паспорт, методические рекомендации и прошедшие инструкцию по технике безопасности.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ФОКУСИРОВКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОДИНОЧНЫМИ ЛИНЗАМИ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучить характер и особенности лазерного воздействия на материал в зависимости от положения фокуса линзы относительно поверхности обрабатываемого образца.

Основные положения по работе.

Для любой оптической системы существует конечный предел остроты фокусировки, называемый дифракционным, он определяет минимальный размер фокального пятна и, как следствие, максимальную достижимую плотность мощности излучения.

Фокусировка лазерного излучения осуществляется линзами или объективами линз с фокусным расстоянием 25-300 мм и рабочими диаметрами от 10-20 мм до 60 мм и более. Также используют зеркала, зеркальные объективы, комплекты переключаемых и сменных объективов, вращающиеся и фокусирующие линзы. В области видимого излучения и в близкой к инфракрасной области спектра для фокусировки применяют стеклянные линзы, в инфракрасной области спектра линзы из NaCl, KCl, Ge, GaAs, ZnSe и др., что позволяет получать в фокусах оптических систем удельную мощность около $10^6 - 10^{10}$ Вт/см², а также плотность энергии 10^3-10^5 Дж/см².

В зависимости от параметров лазерного излучения и фокусирующих оптических систем диаметры сфокусированных лазерных пучков составляют 10 мкм - 1 мм.

Расчет параметров фокусирующих систем осуществляется на основе положений оптики. Различают физическую и геометрическую оптику. В физической оптике рассматривается волновая природа света и изучаются свойства последнего (монохроматичность, интерференция, когерентность и др.). В геометрической оптике закономерности устанавливаются на основе представления светового потока как направления распространения энергии.

При расчете фокусирующих систем в основе лежит геометрическая оптика.

Основные положения геометрической оптики достаточно подробно рассматривались с курса физики. Здесь же продемонстрируем прохождение луча через линзу по схеме, представленную на рис. 1.1.

Выходной луч проходит на высоте h_1 параллельно оси линзы ($\gamma_1=0$).

Материал линзы имеет коэффициент преломления n , толщина линзы d_n , радиусы кривизны поверхностей 1 и 2 – r_1 и r_2 – находятся в воздухе. После преломления на поверхности 1 угол наклона луча γ_2 к оси линзы составил:

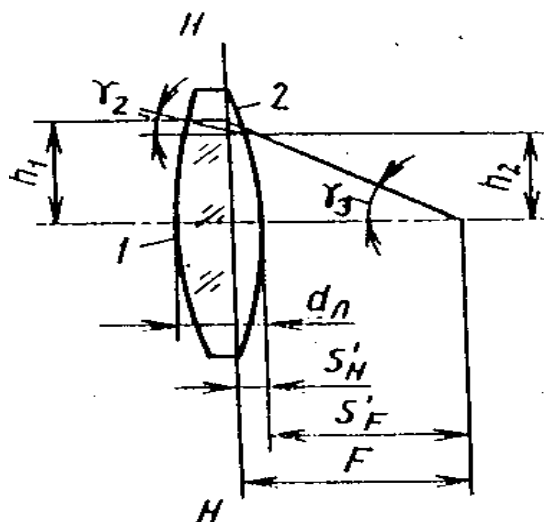


Рисунок 1.1

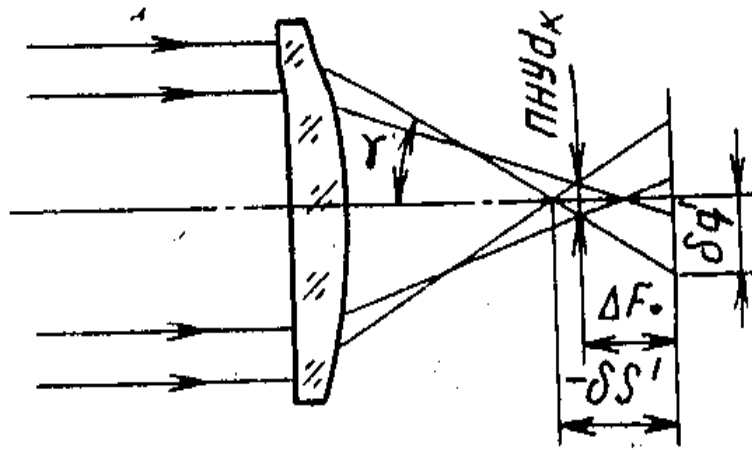


Рисунок 1.2

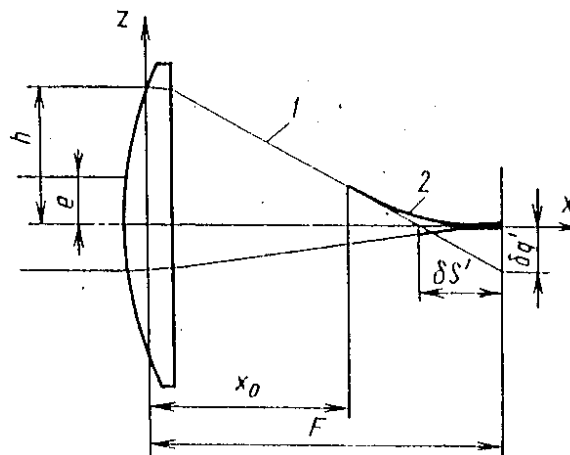


Рисунок 1.3

$$\gamma_2 = h_1(n-1)/nr_1 \quad (1.1)$$

Высота пересечения луча с поверхностью 2

$$h_2 = h_1(1-d_l(n-1))/nr_1 \quad (1.2)$$

Угол наклона луча, вышедшего из линзы:

$$\gamma_3 = h_1((n-1)(1/r_1 - 1/r_2) + d_l(n-1)^2/nr_1r_2) \quad (1.3)$$

Фокусное расстояние линзы $F = h_1 / \text{tg } \gamma_3$

Считая, что лучи параксиальные, (т.е. близко проходят к оптической оси), можно принять $\gamma_3 = \text{tg } \gamma_3$ и тогда

$$F = h_1 / \gamma_3 \quad (1.4)$$

Подставим в формулу (1.4) выражение (1.3) и получим соотношение для оптической силы Φ линзы, являющейся величиной, обратной фокусному расстоянию.

$$\Phi = 1/F = (n-1)(1/r_1 - 1/r_2) + d_l(n-1)^2/nr_1r_2 \quad (1.5)$$

Расстояние от фокального пятна до вершины линзы

$$SF' = F(1 - d_l(n-1))/nr_1 \quad (1.6)$$

Расстояние от вершины до главной плоскости Н-Н

$$SH' = Fd_l(n-1)/nr_1 \quad (1.7)$$

Важным свойством лазерного излучения является монохроматичность, показывающая, что при фокусировке лазерного луча будут отсутствовать хроматические aberrации, возникающие вследствие зависимости показателя преломления от длины волны.

При лазерной обработке в большинстве случаев фокусирующие системы располагают так, чтобы главная плоскость была перпендикулярна оси лазерного излучения. В этом случае учитывается только сферическая aberrация.

Рассмотрим более подробно сферическую aberrацию на примере прохождения параллельного пучка лучей через линзу (рис.1.2). Для упрощения первую поверхность представим плоской, и лучи проходят ее без преломления. Вторую поверхность (сферическую) они встречают с различными углами падения. Поэтому наиболее удаленные от оптической оси лучи преломляются сильнее остальных и сходятся за линзой в точке, расположенной на наименьшем расстоянии от вершины линзы. Это приводит к тому, что исходный цилиндрический пучок излучения после преломления линзой получает вид не конуса, а воронкообразной фигуры, и точечное изображение в фокусе отсутствует.

Расстояние по оптической оси между фокальной плоскостью и точкой схода крайних лучей $\delta S'$ называется продольной сферической aberrацией. Радиус круга рассеяния в фокальной плоскости $\delta q'$ называется поперечной сферической aberrацией. Наименьший круг рассеяния образуется на расстоянии ΔF от фокальной плоскости. Плоскость, соответствующая наименьшему кругу рассеяния, называется плоскостью наилучшей установки (ПНУ).

Диаметр круга рассеяния в плоскости наилучшей установки ориентировочно составляет 1/2 величины поперечной сферической aberrации:

$$dk = \delta q'/2 \quad (1.8)$$

а расстояние от ПНУ до фокальной плоскости приближенно равно 3/4 продольной сферической aberrации $\Delta F = 3/4 \delta S'$.

При определении размера фокального пятна dp следует учитывать, что последний складывается из составляющей dw , обусловленной расходимостью, и составляющей da , обусловленной aberrациями:

$$dp = dw + da \quad (1.9)$$

составляющая dw определяется по формуле:

$$dw = FW \sim 1,2\lambda F/D \quad (1.10)$$

здесь λ - длина волны лазерного излучения;

F - фокусное расстояние линзы;

D - диаметр луча;

W - расходимость лазерного пучка.

Составляющая da определяется по формуле:

$$da = \delta q'/2 = PD^3/32 F^2 \quad (1.11)$$

$\delta q'$ – абберация линзы

$P = (\gamma^2/(1/n-1))^2 \gamma^2/n$ - параметр, зависящий от геометрии линзы и коэффициентов преломления материала, из которого выполнена линза.

В тех случаях, когда линза установлена относительно луча не точно, возникающий эксцентриситет e приводит к увеличению aberrаций и снижению эффективности обработки. С другой стороны, смещение оси линзы относительно оси лазерного излучения вызывает соответствующее смещение фокуса луча. При эксцентричном расположении линзы продольная aberrация по контуру изменяется (см. рис. 1.3), что делает неопределенным положение плоскости наилучшей установки. Так как для лазерной обработки в конечном итоге важно получить минимальную площадь фокусного пятна и максимальную концентрацию энергии, то целесообразно считать плоскостью наилучшей установки нормальную к оси линзы плоскость, в которой площадь поперечного сечения лазерного излучения будет минимальной.

Оборудование и материалы: Светолучевой станок, выполненный на базе станка ВП-910 М; измеритель мощности лазерного излучения; осциллограф; приспособление для установки и фиксации образцов; обрабатываемый образцы; измерительный инструмент.

На двухкоординатном станке ВП-910 М установлены лазерные излучатели типа: ЛГН-704 с длиной волны излучения 10,6 мкм и максимальной мощностью излучения 40 Вт; и ЛТН-ЮЗ с длиной волны излучения 1,06 мкм и максимальной мощностью излучения 250 Вт. Станок обеспечивает перемещение образца по одной координате (y) и поворотного зеркала и фокусирующей системы по второй координате (x) в диапазоне скоростей от 0,1 до 2,8 м/мин.

Измеритель мощности лазерного излучения - ИМО-2Н; ИМО-4Н служит для измерения и установки требуемого уровня мощности лазерного излучения. Осциллограф, включенный последовательно с заслонкой, перекрывающей лазерное излучение, позволяет регистрировать длительность воздействия лазерного излучения.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

1. Ознакомиться с порядком включения станка ВП-910 М и правилами эксплуатации лазерной установки.
2. Установить в фиксирующее приспособление опытный образец.
3. Включить установку.
4. Установить требуемые параметры излучения в соответствии с выполняемым этапом

работы.

5. Получить три следа воздействия излучения на образец при разных значениях переменного параметра.
6. Провести необходимые измерения полученного следа воздействия (ширину, глубину зоны разрушения) и занести результаты измерений в таблицу I.
7. Построить соответствующие зависимости в виде графиков.
8. Перейти к очередному этапу.
9. Порядок выполнения работы на следующих этапах тот же.

ЭТАПЫ РАБОТЫ:

1. Определить влияние фокусного расстояния на глубину зоны разрушения при различных скоростях перемещения исследуемого образца.

Осуществитьрезы, образца при мощности лазерного излучения, генерируемого ЛТН-103 - 150 Вт при скоростях перемещения образца 1,0 м/мин; 1,5 м/мин; 2 м/мин, последовательно используя фокусирующие линзы с фокусными расстояниями $F=100$ мм, $F=200$ мм.

Фокальная плоскость располагается на поверхности образца. Определить размеры полученных резов. Построить графики зависимостей $H=f(v)$, $b=f(v)$ при разных значениях фокусного расстояния фокусирующих систем. Здесь H - глубина проплавления; v - скорость перемещения образца; b - ширина реза, определенная на поверхности обрабатываемого образца.

2. Определение влияния положения фокальной плоскости относительно поверхности обрабатываемого образца на размеры реза.

Обработку производить при следующих положениях фокальной плоскости:

1. Фокальная плоскость находится на поверхности образца; принимаем это положение за нулевое;
2. Фокальная плоскость поднята над поверхностью образца на величину $\Delta = +3; +5$ мм;
3. Фокальная плоскость заглублена внутрь образца на расстояние $\Delta = -3; -5$ мм от его поверхности.

Реzy образца осуществлять излучением ЛТН-103 мощностью - 150 Вт при скорости перемещения образца 2 м/мин, используя линзу с фокусным расстоянием $F=100$ мм. Определить размеры полученных резов. Построить графики зависимостей $H=f(\zeta)$, $b=f(\zeta)$ где ζ - относительное положение фокуса линзы.

3. Определение влияния эксцентриситета луча на размеры реза.

Реzy образца произвести при следующих условиях:

Фокальная плоскость при эксцентриситете, равном 9, находится на поверхности образца.

Реzy образца осуществлять излучением ЛТН-103 мощностью 150 Вт при скорости перемещения образца 2 м/мин, используя линзу с фокусным расстоянием $F=100$ мм, последовательно создавая эксцентриситет относительно нулевого положения 3; 6; 9 мм.

Определить размеры полученных резов. Построить графики зависимостей $H=f(e)$, $b=f(e)$ где e - величина задаваемой эксцентриситета.

По решению преподавателя повторить выше перечисленные этапы работы, используя в качестве источника излучения ЛТН-704 с длиной волны излучения $\lambda = 10,6$ мкм.

ПРОТОКОЛ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ДОЛЖЕН СОДЕРЖАТЬ:

Наименование работы;

Цель работы;

Краткое изложение основных положений по работе;

Схему передачи лазерного излучения от излучателя к образцу, используемую на

экспериментальном стенде;

Экспериментальные значения, занесенные в таблицу 1;

Графики зависимостей, предложенные в этапах лабораторной работы;

Выводы по результатам работы.

Таблица 1

№ эта па	Мощность излучения, Вт	Скорость перемещения, м/мин	Положение фокальной плоскости, Δ мм	Величина эксцентриситета e , мм	Глубина реза H , мм	Ширина реза на поверхности образца B , мм
1						
2						
3						

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Основные геометрические характеристики линзы, используемой в качестве-фокусирующего эксперимента.
2. Что оказывает влияние на размер фокального пятна?
3. Как влияет эксцентриситет луча относительно оптической оси линзы на размер и положение фокального пятна?
4. Каково влияние пространственных характеристик (положение фокальной плоскости, эксцентриситета луча на размеры реза).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник /Н.Н.Рыкалин, А.А.Углов, И.В.Зуев, А.В.Кокора, - М.: Машиностроение, 1985. - 496 с.
2. Справочник по технологии лазерной обработки / В.С.Коваленко, В.П.Котляров. В.П.Дятел и др.; Под ред. В.С..Коваленко. - Киев.: Техника, 1985. 167 с.
3. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1989. - 304 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Ознакомиться с методами поверхностного упрочения металлов при воздействии на них импульсного лазерного излучения.

При интенсивности лазерного излучения меньшей некоторого критического значения не происходит разрушения поверхности образца. Температура поверхности в этом случае определяется распространением тепла в образце, и ее значение зависит от условий взаимодействия излучения с образцом и интенсивности излучения. Если температура поверхности превышает температуру плавления, то на поверхности образца образуется расплавленная зона - в материале образца происходит фазовый переход из твердого состояния в жидкое. Во многих материалах фазовые превращения могут происходить и при температуре, меньшей температуры плавления; типичным примером могут служить сплавы железа, в которых при изменении температуры происходят

различные структурные превращения. Примером процесса лазерной термообработки, при котором происходят такие структурные превращения, является закалка различных материалов (этот процесс не обязательно сопровождается появлением расплавленной зоны). При других видах лазерной термообработки поверхностный слой материала расплавляется - это процессы поверхностного легирования, наплавка, амортизация (стеклование).

Поскольку поверхностную термообработку металлов можно выполнять не только лазерным излучением, но и с помощью других источников энергии (токи высокой частоты, электронный луч), следует отметить основные преимущества лазерной термообработки:

- допустима локальная термообработка избранных участков поверхности образцов в местах, недоступных при других методах обработки; конфигурация обрабатываемого участка может быть трехмерной;

- вследствие большой скорости при лазерной термообработке образец деформируется меньше, чем при обработке другими методами; в этом отношении лазерная термообработка аналогична электронно-лучевой.

- в отличие от электронно-лучевой технологии в случае лазерной термообработки отпадает необходимость вакуумирования образца, термообработку можно проводить в различных (активных и нейтральных) газовых средах; отсутствует рентгеновское излучение от образца (при $q < 10^8$ Вт/см²).

Особенности упрочнения деталей импульсным лазерным излучением.

При импульсной обработке упрочняемая зона складывается из отдельных единичных зон облучения, представляющих собой поперечное сечение лазерного луча в импульсе, поэтому производительность процесса обработки зависит от размеров единичных пятен обработки, коэффициента перекрытия единичных пятен обработки K , частоты следования импульсов.

При импульсной лазерной обработке с использованием сферической оптики поверхностный слой детали, материала с измененными свойствами представляет собой ряд единичных частично перекрывающихся зон лазерного воздействия, смещенных относительно друг друга вдоль оси перемещения на величину шага обработки S (рис. 3.1а). Скорость термической поверхностной линейной обработки:

$$v = \frac{L}{t} = K f D \quad (3.1)$$

Где K – коэффициент перекрытия; f – частота следования импульсов; D – диаметр зоны лазерной обработки.

Увеличение шага приводит к увеличению скорости обработки, но при этом возрастает площадь необработанных участков детали.

Для получения удовлетворительной равномерности глубины упрочненного слоя K обычно составляет $\sim 0,2-0,5$. Кроме этого, для обеспечения оптимального заполнения обрабатываемой площади (с учетом максимальной равномерности глубины упрочнения) необходимо оптимальное соотношение шага S относительно перемещения образцов по оси X и шага S' по оси Y .

Для оценки эффективности реализации схем поверхностного упрочнения импульсным лазерным излучением, представленных на рис. 3.1, используем коэффициент заполнения площади обработки $K_3 = F'/F$ (F' – площадь облученной поверхности; F – площадь детали, подлежащей обработке), и коэффициент использования импульсов $K_{\text{п}}$, равный действительной площади, облученной импульсами, к максимальной теоретической площади

обработки тем же числом импульсов, т.е.:

$$K_{\Pi} = \frac{4F'}{n\pi D^2}$$

Где D – диаметр зоны обработки.

Схема поверхностного упрочнения (рис.3.1а) характеризуется малым коэффициентом заполнения площади ($K_3=0,8$) и сравнительно высоким коэффициентом использования импульсов K_{Π} , что определяет высокую производительность и скорость обработки. В этой схеме отсутствуют взаимоперекрывающиеся участки.

Схема размещения зон обработки с минимально перекрытыми участками приведена на рис. 3.1б. Это условие достигается при отсутствии относительного смещения центров зон обработки соседних рядов, т.е. при $S=S'=0,7D$ (коэффициент перекрытия $K=S/D$). В этом случае обеспечивается максимальное заполнение площади ($K_3=0,96$), однако, коэффициент использования импульсов невысок ($K_{\Pi}=0,46$).

Размеры перекрывающихся участков достаточно велики, что обуславливает непроизводительное расходование энергии импульсного излучения. Данный недостаток в меньшей мере проявляется при схемах обработки, показанных на рис.3.1в, г, т.е. в случае использования относительного смещения по горизонтали центров лазерного воздействия на величину $S/2$ в соседних рядах.

**Схемы поверхностного упрочнения импульсным лазерным излучением
при использовании сферической оптики**

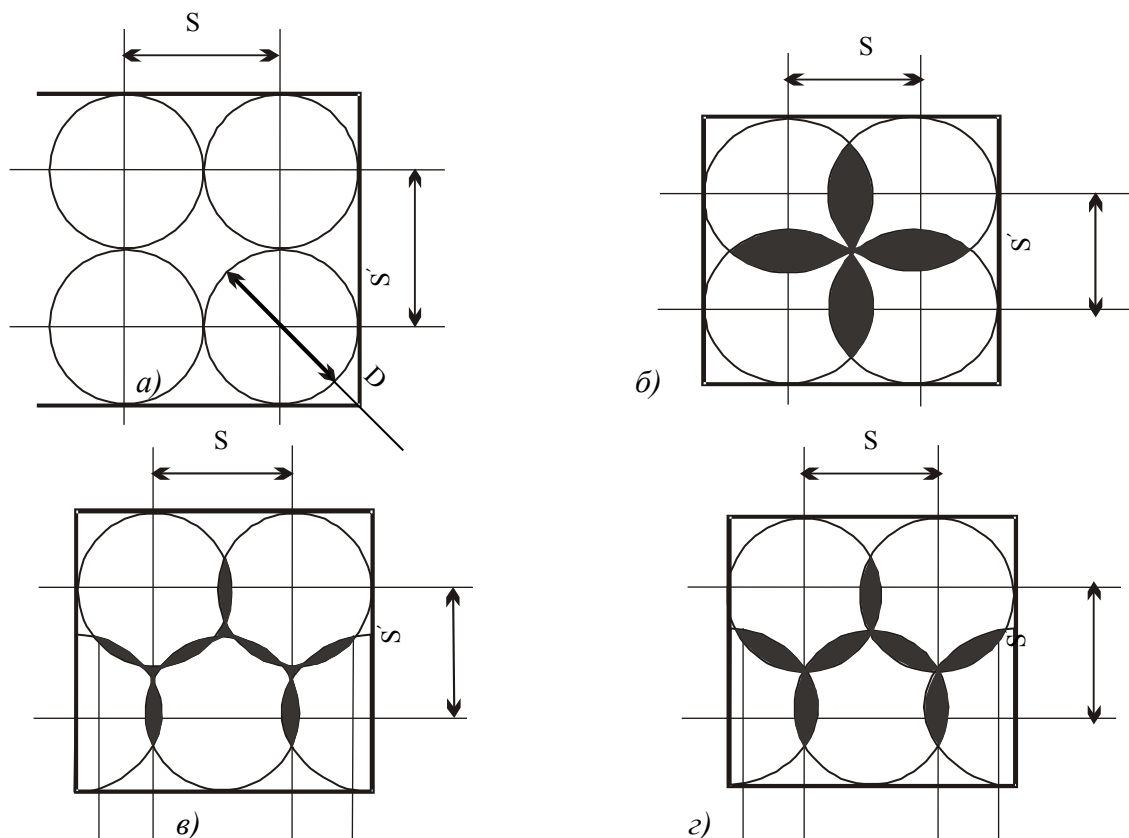


Рис. 3.1

Для схемы, представленной на рис.3.1б, существует оптимальная величина шага $S=S'=0,8D$. В этом случае участки перекрытия зон лазерного воздействия не одинаковы по площади, но различие незначительно и существенно не влияет на степень заполнения поверхности, т.е. $K_3=0,94$, при $K_{II}=0,72$.

Производительность процесса Π лазерного поверхностного упрочнения (площадь поверхности, облученной в единицу времени):

$$\Pi = \frac{\pi D^2 K_{II} f}{4} \quad (3.2)$$

Где D – диаметр зоны лазерного воздействия; f – частота следования импульсов излучения.

В случае использования цилиндрической оптики зона единичного воздействия представляет собой прямоугольник со скругленными краями с радиусом, равным примерно половине ширины зоны ($R=B/2$) облучения. Схемы упрочнения излучением импульсных лазеров с использованием цилиндрической оптики представлены на рис. 3.2. Они представляют последовательные ряды единичных зон обработки, смещенных одна относительно другой на величину шага, причем $S=1+BK$ ($K=S/1$ – коэффициент перекрытия; S – расстояние между ближайшими центрами скругления двух соседних зон обработки; 1 – длина зоны обработки).

Вводя параметр $\lambda_1=\lambda-B$, получим:

$$S = \lambda - B (1 - K) \quad (3.3)$$

Как и при использовании сферической оптики, первая схема упрочнения (рис.3.2а) характеризуется отсутствием перекрывающихся участков обработки и максимальной производительностью.

Схемы поверхностного упрочнения импульсным лазерным излучением при использовании цилиндрической оптики

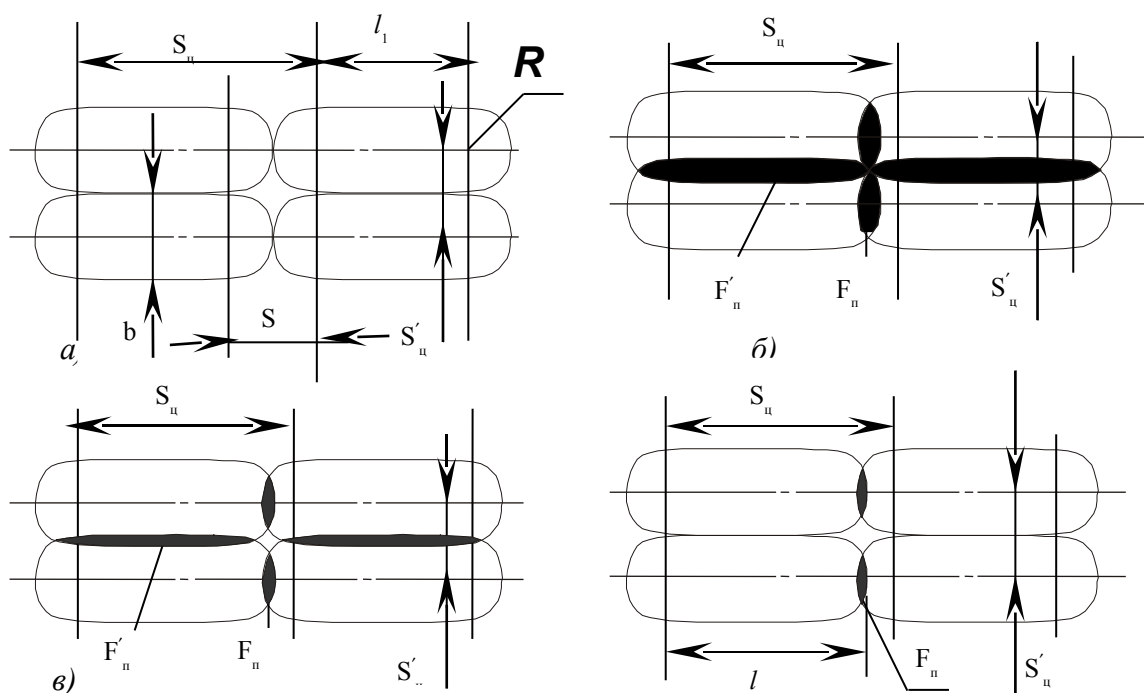


Рис. 3.2

Шаг размещения зон обработки по оси X при $K_{\Pi}=1$:

$$S = (\lambda - B) + BK = \lambda \quad (3.4)$$

по оси Y:

$$S = B \cdot K_{\Pi} \quad (3.5)$$

Производительность процесса в этом случае:

$$\Pi = (\lambda B - 0,21B^2) \cdot f \quad (3.6)$$

Температура на поверхности детали в процессе термоупрочнения импульсным излучением и время воздействия ЛИ с материалом определяются по формулам:

$$T_0 = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot q_0}{\alpha} \sqrt{\frac{\beta \cdot t}{\pi}} \quad (3.7)$$

ε - поглощательная способность материала;

q_0 – средняя мощность падающего излучения (Вт/см²);

α - теплопроводность, Вт/см °С;

β - температуропроводность, см²/с;

t – время взаимодействия, с;

Задавая температуру закалки и плотность мощности лазерного излучения, теплофизические параметры обрабатываемого материала, можно определить время взаимодействия и скорость перемещения лазерного луча:

$$t = \left(\frac{T_0(t) \cdot \alpha}{2 \cdot \varepsilon \cdot q_0} \right)^2 \cdot \frac{\pi}{\beta} \quad (3.8)$$

Учитывая:

$$v \approx \frac{2 \cdot r}{t} = \frac{d}{t} \quad (3.9)$$

$$v \approx \frac{8 \cdot r \cdot \beta \cdot (\varepsilon \cdot q_0)^2}{(T_0(t) \cdot \alpha)^2 \cdot \pi} = \frac{8 \cdot r \cdot \beta}{\pi} \cdot \left(\frac{\varepsilon \cdot q_0}{T_0(t) \cdot \alpha} \right)^2 = \frac{4 \cdot d \cdot \beta}{\pi} \cdot \left(\frac{\varepsilon \cdot q}{T \cdot \alpha} \right)^2 \quad (3.10)$$

Оборудование и материалы: Лазерная технологическая установка «Квант-15»; образцы стали 45, У8Г, чугуна С415-32.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

1. Ознакомиться с инструкцией по технике безопасности при работе на установке «Квант-15».
2. По справочным данным определить химический состав предложенных сталей и чугуна и определить твердость образцов в исходном состоянии.

3. Определить режимы для осуществления лазерного упрочнения образца, для чего необходимо:
 - определить теплофизические параметры;
 - для 5 энергий лазерного излучения в импульсе определить среднюю мощность лазерного излучения;
 - определить плотность мощности лазерного излучения, приняв радиус фокального пятна $r=1, 1,5-2$ мм;
 - по формуле 3.8 определить время взаимодействия, необходимое для термоупрочнения образца;
 - по формуле 3.1 определить скорость термической обработки, предварительно выбрав три значения частоты следования импульсов.
4. Результаты вычислений занести в таблицу.

Протокол лабораторной работы должен содержать:
 Наименование работы;
 Цель работы;
 Основные положения по лабораторной работе;
 Краткое описание лазерной технологической установки «Квант-15» и схему передачи лазерного излучения, реализуемую в данной установке;
 Справочные, теоретически рассчитанные значения режимов, занесенные в таблицу 3;
 Выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Каков общий принцип, используемый при лазерном термоупрочнении?
2. Особенности лазерного термоупрочнения импульсным излучением.
3. Каковы основные параметры, определяющие процесс термоупрочнения импульсным лазерным излучением?
4. Где в настоящее время применяется лазерная закалка в машиностроении?

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник/Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.В. Кокора. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Методы поверхностной лазерной обработки (А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов. – М.: Высшая школа, 1987. – 197 с.
3. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

Таблица 3

Материал образца	Температура закаливании, $T_0, ^\circ\text{C}$	Теплофизические параметры			Параметры ЛИ						
		ϵ	$\alpha,$ $\text{Вт}/\text{см}^\circ\text{C}$	$\beta,$ $\text{см}^2/$	Е, Дж	Р, Вт	г, см	$Q_0,$ $\text{Вт}/\text{см}^2$	t, с	f, Гц	$\nu,$ М мин

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОЙ РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Измерение угловой расходимости лазерного излучения методом сечений и методом фокального пятна.

Наиболее просто расходимость лазерного излучения измеряется методом сечений. Если в дальней зоне измерить диаметры пучка d_1 и d_2 в двух поперечных сечениях рис 6, отстоящих одно от другого на расстояние L , то расходимость пучка можно определить из соотношения:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{d_1 - d_2}{2L}, \quad (13)$$

где d_1 - диаметры пучка в первой зоне, м;
 d_2 - диаметры пучка во второй зоне, м;
 L - расстояние между зонами, м.

Используя данный метод получили, что угловая расходимость составляет $\alpha = 12$ мрад. Погрешность $\varepsilon = 8\%$

Метод фокального пятна наиболее распространен при расхождении. Известно, что преобразование поля ближней зоны излучения идеальной безабберационной положительной линзой приводит к образованию в фокальной плоскости линзы распределения интенсивности, совпадающего с распределением поля излучения в дальней зоне. Плоский фронт волны преобразуется идеальной линзой в сферический, который сходится в фокусе. Лазерное излучение вблизи фокальной плоскости линзы образует пятно радиусом a (рис 7).

Тогда расходимость может быть определена следующим образом:

$$\alpha = \frac{a}{f}, \quad (14)$$

где f – фокусное расстояние линзы, м;
 a – Радиус пятна образующегося в фокальной плоскости, м.

Метод сечений

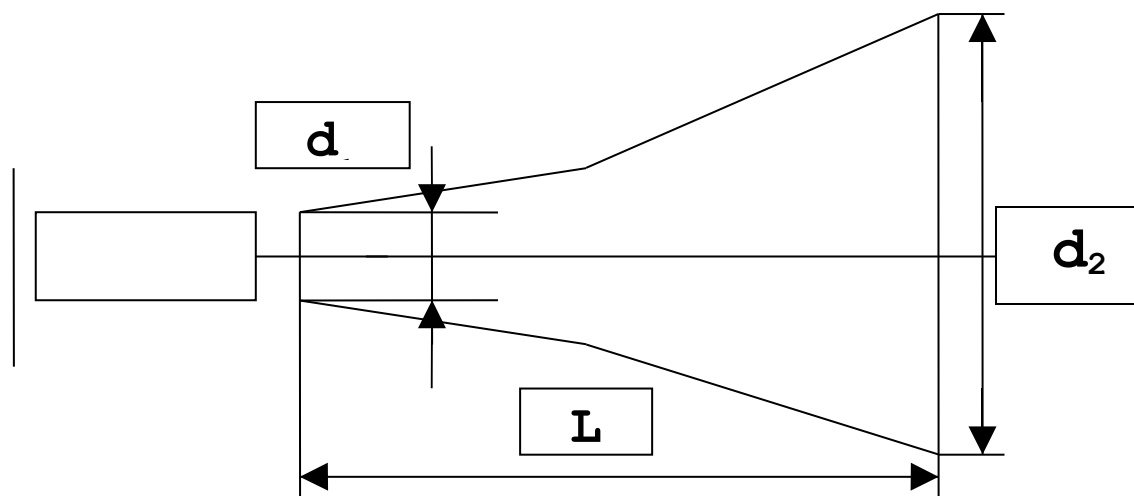


Рис.6

Применяя метод фокального пятна, для повышения точности измерения необходимо

использовать длиннофокусные линзы с большой апертурой. Поле на краях таких линз близко к нулю, поэтому дифракцией, искажающей результат измерений, можно пренебречь.

Измерение расходимости данным методом сводится к точному измерению диаметра $2a$ фокального пятна. Наиболее точно его можно измерить методом Фуко. В фокус линзы с большим длиннофокусным расстоянием помещают диафрагму с плавно изменяющимся отверстием. За диафрагмой устанавливают измеритель мощности. Измерив полную мощность пучка лазера без диафрагмы, а затем измеряя мощность при измерении диаметра отверстия диафрагмы, можно по определенному значению мощности определить диаметр пучка в фокусе, т.е. найти энергетическую расходимость пучка излучения.

Применяя данный метод измерили расходимость:

$$\alpha = 12 \text{ мрад} \quad \varepsilon = 9 \%$$

Метод фокального пятна

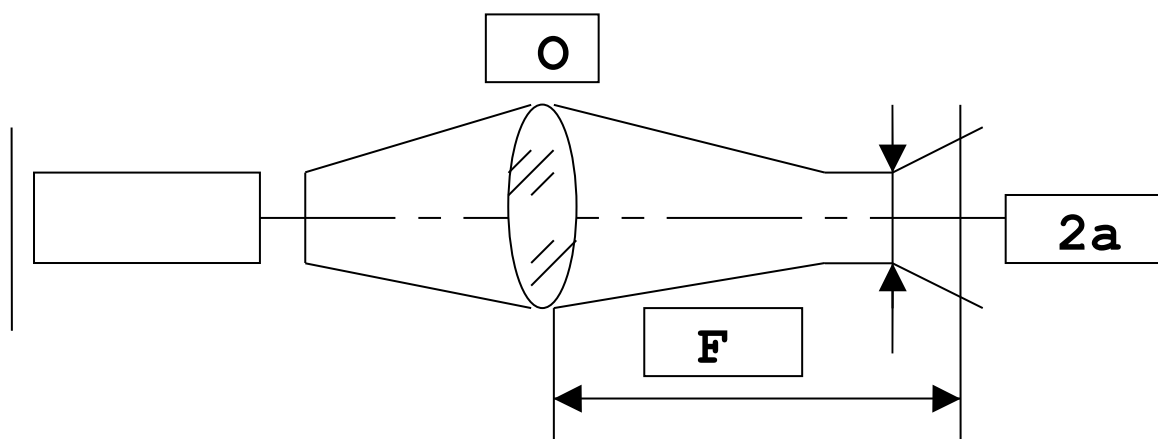


Рис.7

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

Самостоятельная работа студентов включает в себя подготовку к лабораторным работам, зачету и изучение отдельных теоретических вопросов:

1. Математическая модель процесса глубокого проплавления
2. Сварка встык тонких пластин
3. Сварка массивных деталей с неполным проплавлением
4. Термообработка плоских и цилиндрических поверхностей
5. Термообработка поверхности плиты
6. Термообработка цилиндрических поверхностей
7. Термообработка сканирующим лучом
8. Осесимметричный нагрев тела вращения
9. Формирование эвтектики
10. Особенности образования твёрдых растворов
11. Образование метастабильных промежуточных фаз
12. Рекомендации по разработке технологического процесса лазерной наплавки.
13. Сварка сталей.
14. Сварка алюминиевых и медных сплавов.
15. Сварка никелевых сплавов.
16. Сварка титановых сплавов.
17. Сварка керамических и композиционных материалов.
18. Резка неметаллических материалов: кварц, стекло, стеклотекстолит

ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Фокусировка лазерного излучения одиночными линзами. Методика расчета фокусирующих систем. Оптические системы, используемые в технологии лазерной обработки.
2. Физические процессы при взаимодействии лазерного излучения с материалами: Энергетические условия взаимодействия ЛИ при обработке материалов; плазменные процессы при лазерной обработке.
3. Физические процессы при взаимодействии лазерного излучения с материалами: тепловые процессы при лазерном воздействии.
4. Физические процессы при взаимодействии лазерного излучения с материалами: экспериментальное исследование механизма глубокого проплавления.
5. Деформации и напряжения при лазерной обработке.
6. Теоретические и экспериментальные методы определения деформаций и напряжений.
7. Технологическая прочность металлов при лазерной обработке: горячие и холодные трещины.
8. Классификация и сущность методов лазерной обработки материалов.
9. Особенности фазовых переходов при лазерном нагреве железоуглеродистых сплавов.
10. Особенности образования структур в сталях при лазерном нагреве.
11. Особенности формирования структуры сплавов при лазерной обработке с оплавлением поверхности.
12. Структура и строение поверхностных слоев сталей и чугунов после лазерной обработки.
13. Структура и механизмы упрочнения цветных металлов и сплавов.
14. Основные параметры импульсной лазерной закалки и характеристики упрочненной поверхности.
15. Основные параметры лазерной закалки непрерывными лазерами и характеристики упрочненной поверхности.
16. Факторы, влияющие на геометрические размеры зон лазерного воздействия.
17. Свойства сплавов после лазерного воздействия.
18. Лазерное поверхностное легирование.
19. Лазерная наплавка.
20. Классификация способов лазерной сварки.
21. Технологические особенности лазерной сварки.
22. Физические процессы образования сварного соединения при сварке материалов малых толщин и с глубоким проплавлением.
23. Технология лазерной сварки металлов малых толщин и с глубоким проплавлением.
24. Особенности лазерного разделения материалов.
25. Технология разделения материалов лазерным излучением.
26. Лазерное оборудование: СЛТК, УЛК, комбинированные системы.
27. Лазерные технологии в микроэлектронике.
28. Перспективные направления технология лазерной обработки.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная:

1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.:Машиностроение, 1998 г.
2. Цыбин А.С. Физические основы плазменной и лазерной технологий. Учеб. пособие. М.: МиФИ. 2002 г.
3. Коваленко В.С. Технология лазерной обработки. Казань: Казан. гос. техн. ун-т им. А.Н.Туполева. 1999.
4. Гуреев Д. М. Основы физики лазеров и лазерной обработки материалов. Учеб. пособие. Самара: Сам. гос. ун-т, 2001.
5. Григорьянц А. Г. Оборудование и технология лазерной обработки материалов. М.: Высш. шк. 1990.

Дополнительная:

1. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. - М.: Энергоатомиздат, 1985 г.
2. Коваленко В.С. Лазерная технология, - Киев.: Высшая школа, 1989 г.
3. Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Лазерная обработка материалов, М. Машиностроение, 1975 г.
4. Справочник по технологии лазерной обработки / Коваленко В.С., Котляров В.П., Дятел В.П. и др.; под ред. В.С. Коваленко, - Киев.: Техника, 1985 г.
5. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. - Л.: Машиностроение, 1986 г.
6. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов: Пер. с англ. - М.: Мир, 1986 г.
7. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник // Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев и др.: М.- Машиностроение, 1985 г.
8. Промышленное применение лазеров/ Под ред. Г. Кебнера. - М.: Машиностроение, 1988 г.