

Государственный комитет Российской Федерации  
по высшему образованию

Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева

С.П.Мурзин

ПРОИЗВОДСТВО ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Учебное пособие

Самара 1996

УДК 621.791.1

Производство лазерных установок и технологических комплексов: Учеб. пособие /С.П.Мурзин. Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Самара, 1996. 80 с.

ISBN 5-230-16987-7

Изложены особенности производства лазерных установок и комплексов, приведены основы построения производственных процессов изготовления образцов лазерной техники, применяемые средства технического оснащения и технологические методы, рассмотрено влияние технологии изготовления на качество лазерных комплексов. Подробно освещено изготовление основных элементов технологических модулей лазерных установок: координатных столов, оптических элементов; приведена автоматизированная технология изготовления фокусаторов излучения инфракрасного диапазона. Даны рекомендации по составлению маршрутных карт на изготовление и ремонт технологических лазеров и их составных частей.

Предназначено для студентов факультета двигателей, обучающихся по специальности 1312 "Лазеры". Подготовлено на кафедре АСЗУ.

Ил. 31. Библиогр.: 16 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П.Королева

ISBN 5-230-16987-7



Самарский государственный аэрокосмический ун-т, 1996

## С п и с о к   у с л о в н ы х   о б о з н а ч е н и й

- L — длина зоны обработки заготовки;
- $\omega_0$  — угловая скорость вращения обрабатываемой заготовки;
- $\omega, \omega_1$  — угловые скорости вращения инструмента;
- S — подача инструмента;
- $R_a$  — шероховатость обрабатываемой поверхности;
- HRC — твердость материала;
- d — диаметр заготовки;
- Q — натекание;
- V — объем полости;
- $\Delta p$  — изменение давления;
- $\tau$  — время;
- $P_a$  — атмосферное давление;
- $D_{min}$  — газоаналитическая чувствительность;
- $S_a$  — чувствительность испытаний на герметичность.

## ВВЕДЕНИЕ

Область промышленного применения лазерных установок и технологических комплексов в различных отраслях машиностроения достаточно широка. Достижение высоких значений плотности потока энергии делает лазерный луч уникальным инструментом для проведения различных операций обработки материалов (сварка, резка, пробивка отверстий, термоупрочнение, поверхностное легирование и др.). Для успешного применения технологических лазеров их конструкция и параметры излучения должны удовлетворять жестким требованиям, обусловленным потребностями лазерной технологии и условиями эксплуатации на предприятии.

Повышение качества изделий лазерной техники, улучшение их основных параметров, снижение себестоимости достигается технологией их изготовления. Разработка рекомендаций к применению различных технологических методов возможна только после всестороннего изучения общих принципов построения производственных процессов в машиностроении и особенностей производства лазерных установок и комплексов.

Цель пособия — овладение современными принципами проектирования технологических процессов при производстве изделий лазерной техники.

Учебное пособие написано в соответствии с программой курса "Производство лазерных установок и технологических комплексов" специальности ИЗИЗ "Лазеры". Курс отличается прикладным характером и многообразием охватываемых им вопросов, обобщая большой фактический материал. При написании пособия учитывалось, что в соответствии с учебным планом специальности студенты до изучения данного курса получают комплекс необходимых знаний по конструкционным материалам, допускам и техническим измерениям, лазерной технологии, конструкции и проектированию лазерных установок. Представленные материалы систематизируют, обобщают и дополняют известные сведения о построении производственных процессов изготовления лазерных установок и технологических комплексов, а также их составных частей.

## I. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Применение лазерного воздействия позволяет осуществить различные технологические операции в машиностроении, поэтому оборудование на базе технологических лазеров может быть различно по составу.

Технологический лазер (ТЛ) – это источник лазерного излучения, соответствующий заданным техническим требованиям. ТЛ – основной компонент лазерного технологического оборудования, но самостоятельно, без каких-либо дополнительных систем, в промышленности не применяется.

Лазерная технологическая установка (ЛТУ) – это технологический лазер с внешним оптическим трактом. В некоторых случаях в ЛТУ имеется несложный манипулятор изделий. ЛТУ предназначены в основном для создания специализированных комплексов на тех предприятиях, на которых они применяются.

Лазерный технологический комплекс (ЛТК) – это ЛТУ, снабженная манипулятором изделий или оптики, вспомогательной технологической оснасткой и общей системой управления для проведения технологических операций. Только при наличии ЛТК можно выполнять технологические операции в достаточном объеме.

Автоматизированным лазерным технологическим комплексом (АЛТК) считается ЛТК при применении автоматизированного манипулятора изделий и оптики, а также при наличии систем связи между блоками управления манипулятора и лазера.

По назначению и способности выполнять то или иное число операций лазерное технологическое оборудование разделяют на универсальное, специализированное и специальное. Универсальное оборудование используется в единичном, мелкосерийном производстве; специализированное – в серийном; специальное – в массовом. Специализированный ЛТК предназначен для

одного технологического процесса при обработке одной детали. При смене техпроцесса – манипулятор изделия или оптики подлежит замене. Специальные ЛТК создаются для решения специальных единичных крупных задач возможно разового исполнения. Универсальные ЛТК и АЛТК являются общепромышленным оборудованием и предназначены для выполнения нескольких операций. При смене техпроцесса сохраняют свой состав и основные функции.

Вспомогательная технологическая оснастка (ВТО) – это дополни- тельное оборудование, обеспечивающее высокое качество технологичес- ких процессов, носит общепромышленный характер и включается в сос- тав ЛТК по требованию заказчика.

ВТО делится на несколько групп:

1. Оборудование для подготовки технологического процесса (усть- ройства для нанесения поглощающих покрытий и т.д.).
2. Датчики и устройства для контроля за ходом технологического процесса (визуализаторы излучения, пирометры, системы слежения за зазором между технологической оптической головкой и обрабатываемым материалом и т.д.).
3. Вспомогательные устройства для качественного проведения тех- нологических процессов (устройства для подачи защитного и режущего газов, зажимы, фиксаторы и т.д.).
4. Средства защиты и техники безопасности (кожухи, экраны, сис- темы вентиляции).
5. Системы контроля качества обрабатываемых изделий (твердомет- ры, микроскопы и т.д.).

К середине 90-х годов в странах Западной Европы, США и Японии ежегодно изготавливалось около 3 тыс.  $CO_2$  и твердотельных лазеров для обработки материалов.  $CO_2$  –лазеры составляли две трети от обще- го количества.

Фирмы – основные производители  $CO_2$  –лазеров:

США: Spectra Physics (лазеры серии GTE)

Coherent General (серия EFA)

Photon Source (серия VFA)

Германия: Rofin Sinar (серия RS)

Laser Heraeus (серия BW)

Trumpf GmBH (серия TLF)

Великобритания: Ferranti PCd (серия MF).

Структура выпускаемого технологического оборудования:  $CO_2$ -лазеры мощностью свыше 5 кВт составляли около 0,5% от общего количества выпускаемого оборудования,  $CO_2$ -лазеры мощностью 2-5 кВт - 2%,  $CO_2$ -лазеры мощностью 0,1-2,0 кВт - 35%,  $CO_2$ -лазеры мощностью менее 0,1 кВт - 25%, остальное - твердотельные лазеры.

Ежегодный прирост производства лазерных установок за рубежом составляет 8-10%. Основными потребителями являются фирмы США, которые 60-70% лазерных установок используют для резки, 30-40% для термообработки и сварки.

К началу 90-х годов у нас в стране был освоен выпуск твердотельных технологических лазеров серии "Квант" и ЛТН, выпущено несколько десятков экспериментальных  $CO_2$ -установок, освоено мелкосерийное производство лазеров на базе излучателя "Карат", начато серийное изготовление технологической установки на базе лазера ЛОК-2, подготовлены к серийному производству лазеры "Лантан" (мощностью 2-3 кВт в непрерывном режиме, 1,5 кВт - в импульсно-периодическом режиме), ТЛ-1,5; ТЛ-5.

В настоящее время в стране спрос на технологические лазеры снижается, сокращается их выпуск и закупки за рубежом. Особенность размещения оборудования: относительно большое число лазерных установок работает в научно-исследовательских центрах и заводских исследовательских лабораториях.

Основными причинами медленного внедрения лазерной техники являются:

1. Высокая стоимость оборудования.
2. Наличие дополнительных требований при эксплуатации.
3. Наличие менее дорогих или более отработанных технологий.
4. Недоукомплектованность лазеров технологической оснасткой.
5. Психологическая: быстрый рост возможностей и низкая работоспособность ранних установок.

Для повышения эффективности использования лазерного оборудования принимается следующий ряд мер:

улучшение конструкции, совершенствование технологии изготовления для повышения надежности ЛТУ и вспомогательного оборудования;

создание блочных систем, значительно снижающих время ремонта оборудования;

переход от выпуска ТЛ к выпуску лазерных станков, технологических комплексов, обрабатывающих центров.

## 1.1. Требования к производству лазерных установок и комплексов

Особенности производства ЛТУ и ЛТК в первую очередь зависят от типа лазера, его габаритных размеров, назначения и технических требований. Для успешного применения ТЛ в промышленности их конструкция и параметры излучения должны удовлетворять жестким требованиям, обусловленным потребностями лазерной технологии и условиями эксплуатации на предприятии. Эти требования предусматривают: высокое качество лазерного пучка; высокую стабильность мощности, модового и спектрального состава, углового положения лазерного пучка; широкий диапазон управления мощностью излучения; достаточно большой срок эксплуатации (полный ресурс – не менее 10000 часов при не менее 90% времени работы оборудования с генерацией); высокую надежность; максимальную простоту конструкции. Помимо этого существуют требования по ремонтнопригодности, быстростъёмности блоков, узлов и деталей, удобству обслуживания, простоте управления, безопасности работы, возможности дистанционного наблюдения за обрабатываемыми деталями, современному внешнему виду, высокому КПД генерации излучения, низкой стоимости эксплуатации.

Таким образом, ТЛ должен быть автоматизирован, безопасен и оснащен комплектом внешних устройств, т.е. входить в состав ЛТК, должен обладать высокой энергетической и технической эффективностью, хорошими эксплуатационными и эргономическими качествами, иметь большое время наработки на отказ, большой ресурс работы, эстетичную и компактную компоновку, современный дизайн.

Технология изготовления, особенно операции окончательной обработки определяют качество лазерных установок и комплексов, надежность, ресурс работы, основные параметры изделия, себестоимость и производительность труда, поэтому технологические задачи необходимо решать на первой стадии создания ТЛ и ЛТК – при его проектировании и опытном производстве.

Создание такого сложного изделия как ЛТК базируется на общих принципах построения производственных процессов в машиностроении, но существует ряд специфических особенностей:

1. Многодетальность ЛТК. Эта особенность влечет за собой необходимость применения многочисленных и разнообразных технологических процессов, специальной оснастки.

2. Сложность и точность пространственных форм деталей.

3. Большая трудоемкость монтажно-сборочных, регулировочных и испытательных работ.

4. Высокие требования к качеству изделия в целом и его основных элементов.

5. Большой объем работ по подготовке производства.

6. Широкое кооперирование производства. Многие из узлов и приборов ЛТК значительно отличаются друг от друга по конструкции, техническим требованиям к ним и процессам их изготовления, что требует специализации.

Так, важнейшими узлами ТЛ, определяющими его энергетическую эффективность и компактность, являются источники питания и устройства накачки. От качества и ресурса работы оптических элементов в первую очередь зависит стабильность выходных характеристик и надежность работы лазерной установки в целом. Системы сервоуправления и числового программного управления (ЧПУ) определяют функциональные возможности ЛТК в целом. От устройств обратной связи зависит качество обрабатываемых деталей.

На одном предприятии организовать эффективное производство перечисленных узлов невозможно, поэтому необходима широкая кооперация специализированных предприятий энергетической, оптико-механической, электронной отраслей промышленности.

## 1.2. Построение производственных процессов

Производственный процесс, состоящий из совокупности всех действий, направленных на изготовление и ремонт ЛТК, сложен и многообразен. Он включает в себя изготовление и обработку заготовок для получения из них деталей, сборку из деталей узлов, агрегатов и изделий, их испытание, технический контроль, хранение и перемещение на всех стадиях изготовления деталей, организацию снабжения и обслуживания рабочих мест, управление всеми звеньями производства, все работы по технической подготовке производства.

Рациональное построение производственного процесса обеспечивается путем его разделения на три составные части:

технологический процесс;

организация технологического процесса в конкретных производственных условиях;

управление технологическим процессом.

Цель рационального построения производственного процесса – наименьшие затраты труда и максимальное обеспечение производственного

процесса при рациональном использовании и непрерывном совершенствовании средств производства.

Проектирование и разработку технологического процесса делят на два этапа:

а) создание маршрутного технологического процесса, содержащего рациональную последовательность технологических операций;

б) разработка операционных технологических процессов, содержащих все необходимые сведения для осуществления каждой операции всего технологического процесса.

Каждый технологический процесс изготовления любого машиностроительного изделия является интегральным процессом производства, состоящим из комплекса взаимосвязанных частных технологических процессов. При производстве ТЛ и ЛТК выделяют следующие частные технологические процессы:

- а) изготовление деталей из монолитных заготовок;
- б) механическая обработка резанием;
- в) заготовительно-штамповочные работы;
- г) электрофизическая и электрохимическая обработка;
- д) сварочно-сборочные работы;
- е) общая сборка и монтажные работы;
- ж) регулировочно-испытательные технологические процессы.

В современном машиностроении добиваются повышения производительности труда путем сокращения производственного цикла. При этом часто исключаются целые технологические переделы или даже частные технологические процессы. Например, повышение точности литья или заготовительно-штамповочных операций позволяет в ряде случаев исключить процессы механической обработки. В целом же, заготовительные процессы в большинстве случаев не обеспечивают заданные требования к точности, качеству поверхности и другим эксплуатационным характеристикам деталей. Поэтому целесообразно вводить дополнительные переделы, разрабатывать и внедрять новые технологические методы, обеспечивающие укороченный производственный цикл и нужное качество и точность деталей.

Средства технического оснащения (СТО) – это совокупность орудий производства для осуществления технологического процесса. СТО подразделяют на оборудование и оснастку. Технологическая оснастка представляет собой инструмент и приспособления. В зависимости от метода обработки функции инструмента могут выполнять резцы, сверла, фрезы, абразивный круг, штампы при механической обработке, пунок

электронов, электрический разряд при электрофизической обработке, анодный растворитель при электрохимической обработке.

В первом случае инструмент выполнен в виде твердого тела, во втором – в виде катода электронной пушки или магнитной линзы, в третьем – в виде электрода в среде диэлектрической жидкости или в среде электролита.

Технологический метод – это совокупность правил, определяющих последовательность и содержание действий при выполнении формообразования, обработки или сборки; перемещения, включая технический контроль, испытания в технологическом процессе изготовления или ремонта. Все технологические методы разделены на группы формообразования, обработки, сборки, контроля и испытаний. Группа формообразования делится на подгруппы методов: литье, формообразование, спекание и электролитическое осаждение.

Литье – это изготовление заготовки или изделия из жидкого материала, который заполняет полость заданных размеров и формы с последующим затвердеванием.

Формование основано на заполнении полости заданных форм и размеров порошковым или волокнистым материалом с последующим сжатием формовки.

При спекании осуществляется нагрев и выдержка порошковой формовки при температуре ниже температуры плавления основного компонента с целью обеспечения заданных физико-механических свойств.

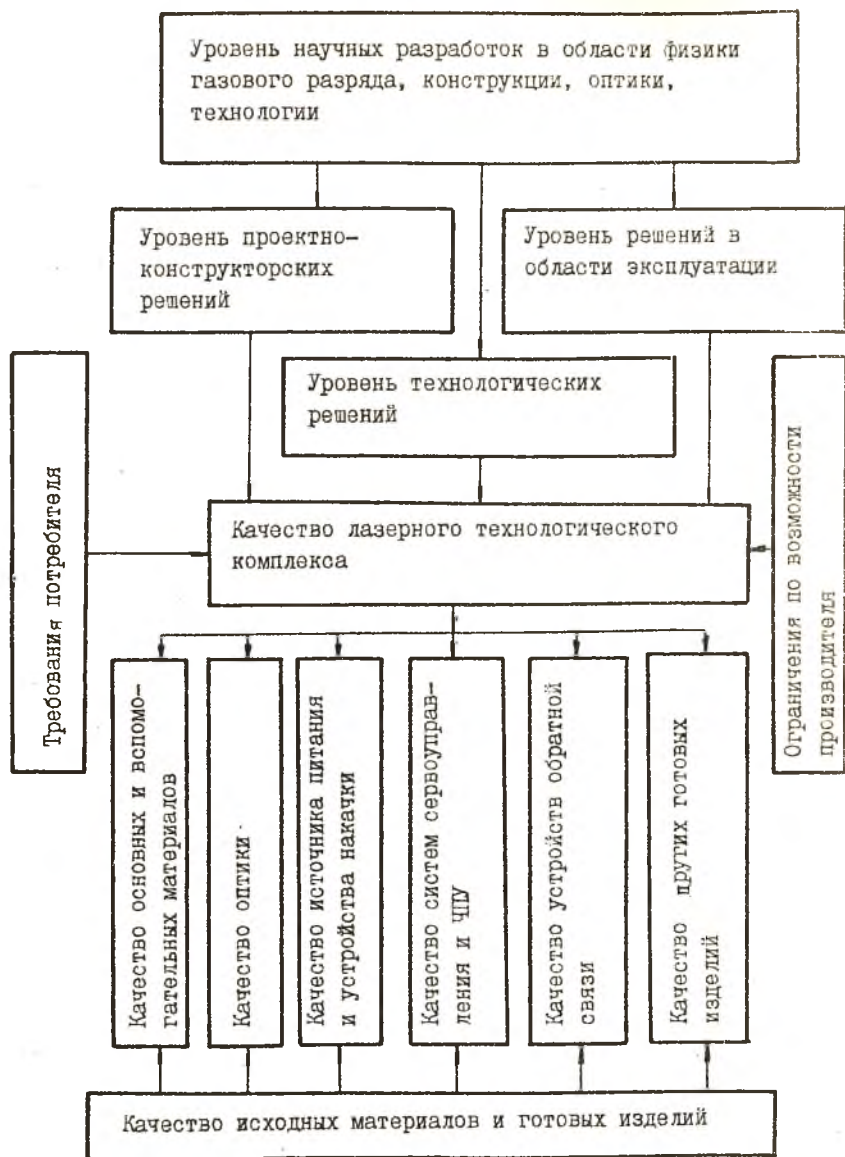
Электролитическое осаждение – это формообразование заготовки или изделия из жидкого материала при помощи осаждения металла из раствора под действием электрического тока.

Технологические методы сборки основаны на образовании соединений составных частей изделия. Соединение может быть как разъемным, так и неразъемным. Примерами методов образования неразъемных соединений являются методы клепки, сварки, пайки.

Качество – совокупность свойств продукции, обуславливающих пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением. При анализе качества изделий используются восемь групп показателей качества:

1. Показатели назначения. Определяют способность изделия выполнять заданные функции в соответствии с современным уровнем науки и техники.

2. Показатели надежности. Характеризуют способность изделия выполнять поставленную задачу в течение заданного срока и при соблюдении заданных параметров.



Р и с. 1.1. Схема формирования качества ЛТК как сложной технической системы

3. Показатели технологичности. Определяют степень совершенства конструкции изделия с точки зрения требований производства.

4. Экономические показатели. Определяют затраты на проектирование и производство, экономическую эффективность в эксплуатации.

5. Эргономические показатели. Определяют степень совершенства системы "человек - машина - среда".

6. Показатели стандартизации и унификации (степень использования стандартных и унифицированных изделий).

7. Патентно-правовые показатели (патентная чистота решений, используемых в конструкции).

8. Эстетические показатели (дизайн).

Наиболее существенное влияние технология оказывает на показатели назначения, надежности, технологичности и экономические. Заданный уровень качества закладывается при проектировании изделия и поддерживается при эксплуатации. Схема формирования качества ЛТК как сложной технической системы представлена на рис. 1.1.

## 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ

Обработка - это действие, направленное на изменение свойств предметов труда при выполнении технологического процесса. Свойства предметов труда - размеры, форма, твердость, шероховатость, другие физико-химические и механические свойства.

В основу классификации технологических методов, представленной на рис. 2.1, по физико-химической природе явлений, происходящих в материале, положен вид энергии, вводимой в зону обработки.

Механическая обработка - это обработка резанием и давлением.

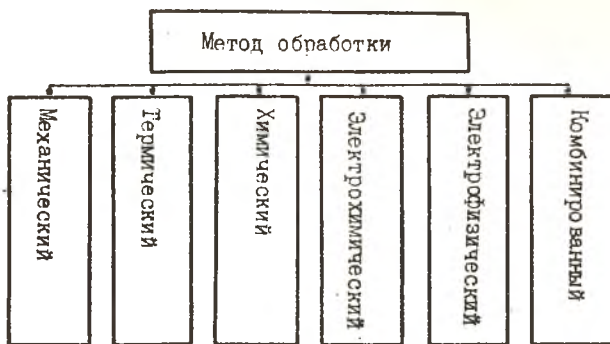
Обработка резанием - отделение поверхностных слоев материала с образованием стружки.

Обработка давлением - пластическое деформирование или разделение материала без образования стружки.

Термическая обработка - изменение структуры и свойств материала за счет теплового воздействия.

Химическая обработка - изменение формы, размеров или свойств поверхности в результате применения химически активных сред.

При наложении на химически активную среду электрического тока образуется новая группа - электрохимические методы.



Р и с. 2.1. Классификация технологических методов по физико-химической природе явлений, происходящих в материале

Электрофизическая обработка – изменение формы, размеров поверхности заготовки с применением электрических разрядов, электронного или оптического излучения, плазменной струи.

Комбинированные методы основаны на сочетании перечисленных методов.

В зависимости от технологического назначения операции, выполняемой данным методом, методы обработки материалов разделяются на группы. Критерий для такого подразделения – припуск материала. Припуск – это слой материала, который удаляется с поверхности заготовки для достижения заданных свойств обрабатываемой поверхности (рис. 2.2).

Результаты применения технологического метода зависят от конкретной реализации данного метода обработки в используемом оборудовании и оснастке. Совокупность средств технического оснащения, которые предназначены для выполнения конкретного метода обработки, называют обрабатывающей системой или технической системой обработки.

Одним из этапов проектирования и разработки технологического процесса является разработка операционных техпроцессов, содержащих все необходимые сведения для осуществления каждой операции. Приведем последовательность действий технолога при разработке операционных техпроцессов:

1. Выбор последовательности операций обработки.
2. Выбор технологического метода для каждой операции.
3. Проектирование последовательности выполнения переходов, включая схемы базирования, и инструментальных наладок.



Р и с. 2.2. Классификация методов обработки по технологическому назначению выполняемых операций

#### 4. Разработка эскизного проекта обрабатывающей системы.

Выбранный технологический метод может иметь различные способы подвода энергии, механизмы обработки, рабочие процессы и кинематические охемы. Способ подвода энергии определяется геометрическими параметрами зоны, в которую вводится энергия, взаимным положением заготовки и рабочих поверхностей в пространстве и характером изменения этого положения во времени. Способ подвода энергии может быть: контактным, его недостаток – износ инструмента; бесконтактным, т.е. плазменным, лазерным и т.д.; комбинированным; стационарным и нестационарным.

Контакт инструмента с заготовкой характеризуется формой контакта и может быть точечным, линейным, плоским и пространственным. При стационарном способе подвода энергии обработка материала происходит при неизменных условиях, а нестационарный способ – прерывистый, вибрационный, импульсный и т.д.

Кинематическая схема обработки характеризуется закономерностями относительного движения инструмента и заготовки.

Механизм обработки определяется основным физико-химическим процессом, обеспечивающим обработку заготовки. К таким процессам относятся: пластическое деформирование; механическое разрушение; плавление; испарение; распыление; электроэрозионное разрушение; электрохимическое растворение; химическое травление; диффузионное насыщение; образование соединения в результате химических, термохимических, плазмохимических реакций; конденсация, кристаллизация; адсорбция; хемисорбция; структурные и фазовые превращения; адгезионное взаимодействие и т.д.

Совокупность явлений, обеспечивающих обработку детали в соответствии с кинематической схемой, называют рабочим процессом обработки или рабочим процессом технологического метода обработки. Рабочий процесс определяется видом энергии и способом ее подвода, кинематической схемой, механизмом и дополнительными физико-химическими явлениями, протекающими в зоне обработки. На этапе выбора технологического метода обработки для выполнения конкретной технологической операции необходимо рассмотреть вид энергии, вводимой в зону обработки, ее кинематическую схему, физико-химический механизм и рабочий процесс.

Только после выбора и анализа технологического метода, а также создания обрабатывающей технологической системы можно перейти к следующему этапу проектирования операционного процесса – назначению режимов обработки и расчету производительности и экономичности процесса.

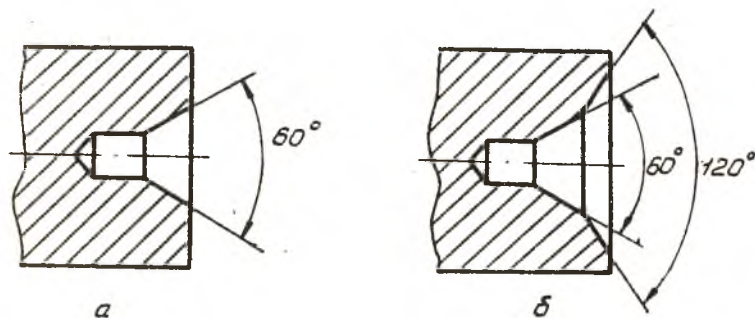
## 2.1. Обработка наружных поверхностей тел вращения

Наружные поверхности тел вращения – это, в основном, детали класса валов: цилиндрической гладкой, цилиндрической ступенчатой, конической или комбинированной формы. Различают черновой, получистовой, чистовой и окончательный этапы их обработки.

В большинстве случаев обработка проводится при установке заготовок на центрах. Для создания баз сначала обрабатывают торцы заготовки, затем производят зацентровку. В качестве технологических баз могут служить цилиндрические отверстия или их фаски. В этом случае в качестве приспособлений применяют центровые оправки. На рис. 2.3 представлены различные виды центровых отверстий. Отверстия без фаски используют при обработке поверхностей заготовок невысокой точ-

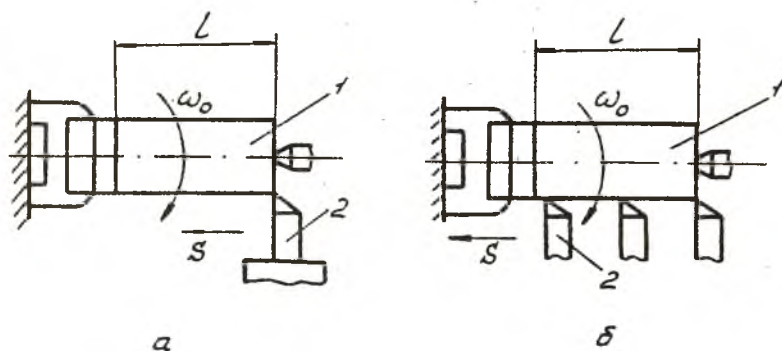
ности. Центровые отверстия с фаской под углом  $120^\circ$ , предохраняющей кромки от повреждении при ударах, применяют при обработке точных поверхностей.

Наиболее высокая производительность, лучшее качество, точность обработки таких отверстий – на фрезерно-центровальном полуавтомате. Применяются также токарные, револьверные и сверлильные станки.

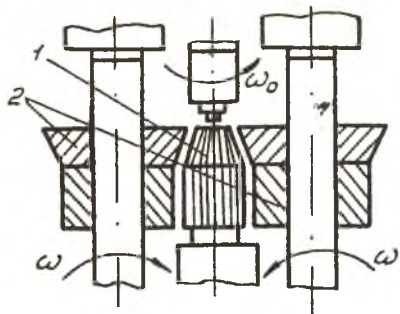


Р и с. 2.3. Центровые отверстия без фаски (а), с фаской под углом  $120^\circ$  (б)

Черновая обработка наружных поверхностей производится чаще всего на токарных обычных станках (рис. 2.4), станках с программным управлением, с копировальным устройством, токарно-многолезцовых станках и ротационно-фрезерных станках.



Р и с. 2.4. Схемы обработки вала на токарном станке (а) и на многолезцовом станке (б): 1 – вал; 2 – резец



Р и с. 2.5. Схема метода ротационного фрезерования: 1 - заготовка; 2 - фреза

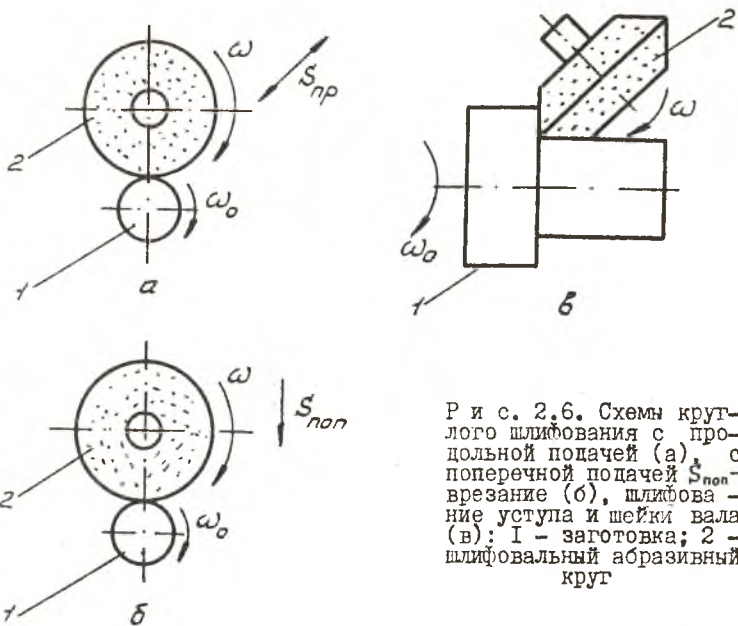
При фрезеровании наружных поверхностей вращения заготовке вала сообщается круговая подача. На двух шпинделях станка установлены фрезы, вращающиеся в разные стороны. При вращении заготовки фрезы обрабатывают поверхности вращения. Если фрезы одинаковые, то обработка заготовки заканчивается в течение половины ее оборота. Схема метода ротационного фрезерования представлена на рис. 2.5.

Протягивание наружных поверхностей вращения. Заготовка получает медленное вращение, а протяжка движется прямолинейно. Каждый зуб протяжки работает как тангенциальный резец. Обработка протягиванием заменяет черновое и чистовое обтачивание коротких шеек заготовки вала.

Чистовая обработка наружных тел вращения производится, в основном, на токарных станках. Редко используются многорезцовые станки, чаще станки обычные, оснащенные гидрокопировальными устройствами.

Поверхности детали, прошедшие термоулучшение (закалку и отпуск) или термохимическую обработку (цементацию и азотирование), имеют высокую твердость. Применять лезвийный инструмент на финишных операциях в таких случаях не всегда возможно. Проводится обработка шлифованием. При шлифовании поверхностей тел вращения снимают небольшой припуск - 0,2...0,5 мм на сторону. Величина припуска определяется дефектами предыдущей операции, к которым относятся шероховатость поверхности, дефектный слой, деформации заготовки при предыдущей обработке. В качестве режущего инструмента применяются шлифовальные абразивные круги и абразивные ленты (при тонком шлифовании). В качестве абразивного материала используют электрокорунд, карбид кремния, карбид бора, карбид циркония, борсиликарбид, эльбор и т.д.

При предварительном шлифовании по схемам, представленным на рис. 2.6, продольная подача  $S_{пр}$  обычно составляет 0,5...0,8 ширины круга на один оборот детали, при окончательной - 0,2...0,5 ширины круга, а глубина резания - 0,005...0,02 мм на каждый проход. Применяются круглошлифовальные станки с двумя-тремя и более кругами, работающими одновременно.



Р и с. 2.6. Схемы круглого шлифования с продольной подачей (а), с поперечной подачей  $S_{\text{поп}}$  - врезание (б), шлифование уступа и шейки вала (в): 1 - заготовка; 2 - шлифовальный абразивный круг

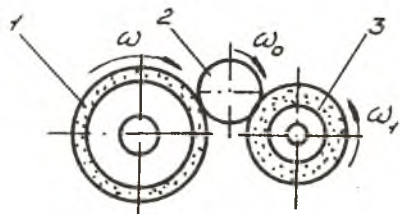
При бесцентровом шлифовании заготовку устанавливают свободно между двумя шлифовальными кругами (рис. 2.7). Круг большего диаметра - шлифующий, круг меньшего диаметра - ведущий.

Ведущий круг вращает заготовку и сообщает ей продольную подачу, если он развернут относительно шлифующего круга.

На бесцентрово-шлифовальных станках можно шлифовать заготовки валов, имеющих форму тела вращения с цилиндрическими, коническими и фасонными поверхностями.

Шлифование абразивной лентой - ленточное шлифование. Абразивная лента в процессе обработки охватывает шейку шлифуемой заготовки вала, которая получает вращательное движение. Лента непрерывно протягивается, чтобы сменить изношенный участок.

Операции отделки наружных



Р и с. 2.7. Схема бесцентрового шлифования: 1 - шлифующий круг; 2 - заготовка; 3 - ведущий круг

поверхностей тел вращения. Для отделки шеек валов широко применяется алмазное выглаживание. При этом сферический или цилиндрический алмазный наконечник прижимается (чаще пружиной) к вращающемуся валу, перемещаясь при этом в продольном направлении. Алмазное выглаживание позволяет получить IО-II класс шероховатости. На поверхности детали образуются сжимающие остаточные напряжения, т.е. происходит улучшение поверхности. Перед отделкой поверхности должны быть точно обработаны, так как отделка не исправляет в достаточной мере погрешностей формы и размеров.

Притирка служит для окончательной отделки предварительно отшлифованных поверхностей. Выполняется чугуном или бронзовым притиром, который предварительно шаржируется абразивным микропорошком (величина зерна 3...20 мкм) с маслом или специальной пастой. Абразивным порошком является корунд, оксид хрома, оксид железа и т.д. Например, пасты ГОИ содержат абразив — оксид хрома, в качестве связки в их состав входят алеиновая и стеариновая кислоты. Операция притирки производится при вращающейся обрабатываемой детали и возвратно-поступательном движении притира. Чаще всего эту операцию делают вручную. Припуск на поволку — 5...20 мкм на диаметр. Скорость вращения обрабатываемой детали  $V_0 \approx 10...20$  м/мин.

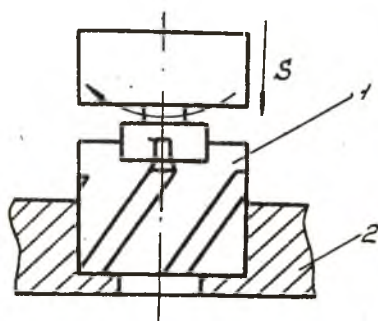
Полирование — процесс обработки поверхности мягким кругом с нанесенным на него мелкозернистым абразивным порошком, смешанным со смазкой. В качестве материалов для кругов используются войлок, фетр, парусина или кожа. Достигается высокая степень чистоты поверхности (I2-I3 класс шероховатости).

## 2.2. Обработка отверстий

Различают цилиндрические, ступенчатые, конические, фасонные, открытые с двух сторон и с одной стороны (глухие) отверстия. Их обработка проводится лезвийным и абразивным инструментом, абразивным порошком и физико-химическими методами. Лезвийным инструментом выполняют сверление, зенкерование, развертывание и протягивание отверстий. Абразивным инструментом отверстия шлифуют, хонингуют и суперфинишируют. Абразивным порошком — притирают. Применяют физико-химические методы: ультразвуковая, светолучевая (в том числе лазерная), электронно-лучевая, электроэрозионная, электрохимическая и алмазно-электролитическая обработка. Механическая обработка отверстий может проводиться без снятия стружки: калибрование при помощи выглаживающих прошивок и шариков, раскатывание.

Один из основных методов обработки отверстий лезвийным инструментом – сверление. Точность обработки при сверлении соответствует 5 и 4 классу, шероховатость поверхности – 4–5 классу. Отверстия диаметром больше 35...40 мм сверлят за два прохода – сначала сверлом меньшего диаметра, затем – требуемого. Отверстия диаметром свыше 60...70 мм целесообразно обрабатывать кольцевым сверлом. В этом случае большая часть металла остается в виде сердечника, пригодного для использования. Различают два метода сверления: вращение сверла и вращением детали. При сверлении отверстий с вращением сверла и увод сверла от оси отверстия больше, чем при сверлении с вращением детали. Для уменьшения увода сверла применяют кондукторы.

Зенкерование применяют для обработки предварительно полученного отверстия литьем, штамповкой или сверлением (рис. 2.8). Для отверстий с точностью до 4 класса и шероховатостью  $R_a = 1,25$  мкм зенкерование может быть или окончательной операцией, или предварительной перед развертыванием. Зенкеры подразделяются на спиральные, цилиндрические и конические. Припуск для зенкерования равен примерно 0,1 диаметра отверстия. Грубое зенкерование после литья или штамповки обеспечивает 5 класс точности, зенкерование после сверления или черного растачивания – 4 класс, шероховатость поверхности  $R_a = 10...2,5$  мкм.



Р и с. 2.8. Схема зенкерования: 1 – зенкер, 2 – заготовка

Развертывание как основной способ обработки отверстий в материале твердостью  $HRC \leq 40$  обеспечивает 1–3 класс точности при шероховатости поверхности  $R_a = 2,5...0,15$  мкм (6–9 класс). Развертыванию предшествуют сверление, зенкерование или растачивание. По способу применения различают машинные, ручные развертки. Инструмент рассчитан для снятия малого припуска и отличается от зенкеров большим количеством зубьев, меньшими углами в плане.

Растачивание. Отверстия растачивают на станках токарной группы – расточных, агрегатных, специальных при вращении детали (токарные станки) и при вращении инструмента (расточные станки – горизонтальные, вертикальные, координатные, агрегатные). При растачивании от-

верстий на агрегатных станках обеспечивается точность обработки отверстий по 3 классу. Тонкое растачивание применяется как окончательная операция обработки отверстий высокой точности и осуществляется при больших скоростях резания — 100...1000 м/мин, малых подачах (0,01...1,12 мм/об) и глубинах резания (0,05...0,4 мм). Отверстия диаметром 50...200 мм и длиной 75...200 мм обрабатываются на вертикальных станках, отверстия меньших диаметров — на горизонтальных. Тонкое растачивание обеспечивает точность отверстия 2 или I класса при шероховатости по 9-10 классу. Погрешность формы (овальность, конусность) составляет 0,003...0,004 мм.

Протягиванием обрабатывают отверстия разного профиля диаметром от 3 до 300 мм с точностью I-3 класса и шероховатостью поверхности по 6-9 классу. Длина протягиваемого отверстия обычно не превышает трех его диаметров. Различают профильное, генераторное и прогрессивное протягивание. Протягиванием можно образовать винтовые и специальные канавки в отверстиях.

Один из основных методов обработки отверстий абразивным инструментом — шлифование. Шлифованием обрабатываются отверстия диаметром 5 мм и более, в некоторых случаях — до 1 мм с точностью I-3 класса и шероховатостью 7-9 класса ( $R_a = 1,25...0,15$  мкм). Различают шлифование отверстий с планетарным движением шпинделя и бесцентровое шлифование отверстий (вращается и деталь).

Хонингованием устраняются овальность, конусность, бочкообразность и другие погрешности формы. Точность I-2 класса, шероховатость 9-II класса ( $R_a = 0,32...0,04$  мкм).

Притирка (доводка) отверстий применяется как отделочная абразивная обработка с точностью размеров I класса, шероховатостью 10-13 класса ( $R_a = 0,16...0,01$  мкм).

Существуют следующие методы обработки отверстий поверхностным пластическим деформированием: дорнование, раскатывание роликами и шариками и алмазное выглаживание. Цель такой обработки: сглаживание неровностей отверстия и повышение точности, процесс сопровождается пластическим деформированием, инструмент, как правило, не имеет зубьев. Дорнование точностью I-2 класса и шероховатостью  $R_a = 0,32...0,08$  мкм (9-10 класс) осуществляется двумя способами: прошивкой и шариками.

Обработка глубоких отверстий. Глубокими называют отверстия, у которых длина в 10 и более раз превышает их диаметр. Большинство точных глубоких отверстий изготавливаются по 3-4 классу точности; оваль-

ность и конусность не должны превышать 0,2...0,25 допуска отверстия. Допускается отклонение оси отверстия от прямой линии, равное 0,2...0,4 мм на I м длины отверстия. Шероховатость поверхности выдерживается по 7-8 классу, реже по 5-6 классу. Различают сплошное и кольцевое сверление.

Обработка отверстий малых размеров. Малые отверстия в деталях диаметром до 0,5 мм изготавливают механической обработкой, отверстия меньших размеров - в основном физико-химическими методами, отверстия диаметром до 0,3 мм - только физико-химическими методами.

### 2.3. Обработка плоских и фасонных поверхностей, обработка резьбы, зубьев колес и шлицев

Основные методы обработки плоских поверхностей - это строгание, долбление, фрезерование, протягивание, шлифование.

При обработке поверхностей строганием и долблением точность и качество поверхностного слоя деталей зависят от режимов, геометрии -ческих параметров режущего инструмента и квалификации рабочего. Средняя точность обработки - 4-5 класс, шероховатость поверхности находится в пределах 3 класса. Долбление применяется преимущественно для обработки внутренних контуров, когда невозможно или затруднительно выполнить эту операцию другими, более прогрессивными методами или в условиях единичного производства.

Более производительным методом обработки поверхностей является фрезерование, применяемое в серийном производстве. Фрезерование цилиндрическими фрезами производится двумя способами: встречное фрезерование и попутное фрезерование. Обработка плоских поверхностей протягиванием и обработка плоских поверхностей шлифованием, притиркой, полированием проводятся аналогично соответствующей обработке отверстий. Обработка плоских поверхностей шабрением осуществляется соскабливанием с помощью металлического инструмента - шабера. Шабрение плоских поверхностей - очень трудоемкий процесс чистовой обработки и выполняется вручную рабочим высокой квалификации. Контроль процесса шабрения - по краске. Для снижения трудоемкости применяют механический способ выполнения этой операции. Шабер имеет возвратно-поступательное движение.

Наиболее производительным методом обработки фасонных поверхностей является обработка фасонным инструментом при точении, фрезеровании, шлифовании, протягивании. Но область применения этих методов

ограничивается небольшими размерами обрабатываемой поверхности. Наиболее широкое применение для обработки фасонных поверхностей деталей различного профиля и размеров получил метод обработки по копиру.

В настоящее время разработано и применяется в практике производства много различных методов обработки резьб. В зависимости от размеров, класса точности и объема производства нарезание резьб производится на токарных, токарно-револьверных, сверлильных, резьбо-фрезерных, резьбо-шлифовальных и резьбо-накатных станках. В качестве основного инструмента для нарезания наружных резьб применяются резьбо-нарезные резцы, гребенки, плашки, фрезы, резьбовые и резьбонарезные головки, а также профилированные шлифовальные крутки и резьбонакатные ролики или плоские плашки. Для нарезания внутренних резьб инструментом являются метчики, резцы, фрезы.

Обработка зубьев колес и шлицев. Для нарезания зубьев существует два метода: метод копирования и метод обкатки. Методом копирования чаще всего нарезают зубья на фрезерных станках с использованием делительных устройств (головок). Метод характеризуется низкой точностью из-за погрешности деления и несоответствия формы инструмента и профиля зубьев. Это черновое нарезание зубьев. В технологии машиностроения чаще всего применяют метод обкатки на зубострогальных, зубодолбежных и зубофрезерных станках. В этом случае точность резания во многом зависит от точности инструмента. Отделка зубьев цилиндрических колес в зависимости от формы, твердости, требуемой точности колес проводится шевингованием, шлифованием, хонингованием, притиркой, иногда полированием. Шлицы на валах обрабатываются чаще всего фрезерованием, реже - строганием, протягиванием и холодным накатыванием.

### 3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИМЕНЯЕМЫХ СОЕДИНЕНИЙ И СБОРКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ

Соединение деталей, узлов и агрегатов технологических лазеров и комплексов при сборке производится различными способами. Применяемые в производстве ТЛ и ЛТК соединения разделяются на неподвижные неразъемные (сварка, пайка, склеивание, развальцовка, клепка), неподвижные разъемные (болтовые и винтовые) и подвижные разъемные (шарнирные соединения, болтовые, валы и подшипники). Соответственно первые две группы соединений обеспечивают неизменное положение собираемых деталей и узлов, а подвижные соединения допускают такие перемещения.

По конструктивно-технологическим признакам соединения разделяют на следующие группы:

а) соединения, выполняемые силовыми точками (болтами, сварными точками, заклепками). Характерными признаками таких соединений являются: ослабление соединяемых деталей; концентрация напряжений в детали и невысокая производительность труда;

б) соединения непрерывным швом (сварка роликовая и плавлением, склеивание, пайка). Их характерные признаки - ослабление соединяемых деталей при их нагреве в процессе сварки, склеивания, пайки, значительная концентрация напряжений в детали в зоне шва и непрерывность процесса соединения, облегчающая механизацию и автоматизацию;

в) комбинированные соединения (точечная сварка и склеивание, клепано-болтовое соединение), обладающие всеми признаками соединений силовыми точками и непрерывным швом.

Выбор того или иного вида соединения зависит от конструкции ТЛ и ЛК и материалов, из которых изготовлены его узлы и детали. Так, например, для соединения остальных деталей чаще применяется электроконтактная и дуговая сварка, а детали из цветных металлов (медные электроды) соединяются пайкой. Металлы с неметаллами чаще всего соединяются клеевым методом. Для конструкций из композиционных материалов наибольшее применение находят клееклепаные и штифто-болтовые соединения.

Наиболее широко применяются в производстве технологических лазеров сварка и пайка. Сварка и пайка позволяют создать принципиально новые высокоэкономичные конструкции, наиболее рациональные по форме и размерам.

Одними из основных преимуществ сварного соединения являются: высокая прочность и герметичность соединений; высокая производительность; широкая возможность механизации и автоматизации. При проектировании конструкций необходимо учитывать влияние сварки на исходные свойства основного материала. Механические свойства материалов после сварки, как правило, ухудшаются, в сварных конструкциях возникают остаточные напряжения и деформации, которые могут влиять на точность изготавливаемого изделия. Из-за неоднородности свойств основного металла и металла шва создаются концентраторы напряжений.

Технологический процесс сборки - сварки плавлением состоит из следующих основных операций:

а) вспомогательные операции (подготовка деталей к сварке, правка их после сварки, удаление флюса с поверхности швов);

б) сборочные операции (установка деталей в сборочное положение и их закрепление);

- в) сварочные операции (прихватка и сварка);
- г) контрольные операции (контроль подготовки кромок, качества прихватки и сварки).

На рис. 3.1 представлена последовательность выполнения основных операций при сварке.

Подготовка кромок свариваемых деталей — достаточно ответственная операция, определяющими факторами которой являются вид шва, толщина и марка материала, особенности конструкции, намечаемый способ сварки и степень его механизации. Наиболее высокую точность кромок обеспечивает механическая обработка.

Очистка поверхностей деталей, прилегающих к кромкам на ширине 50...60 мм, от ржавчины, масла, лакокрасочных покрытий осуществляется обдувкой песком, обработкой наждачными кругами, металлическими щетками или химической обработкой.

Сборка изделия и прихватка проводятся в специальных приспособлениях. Допускается смещение свариваемых кромок на 0,5 мм для толщины не более 4 мм; 1,0 мм для толщины не более 10 мм; 0,1Н для толщины свыше 10 мм, где Н — толщина деталей.

Автоматическая и механизированная сварка проводится только в приспособлении.

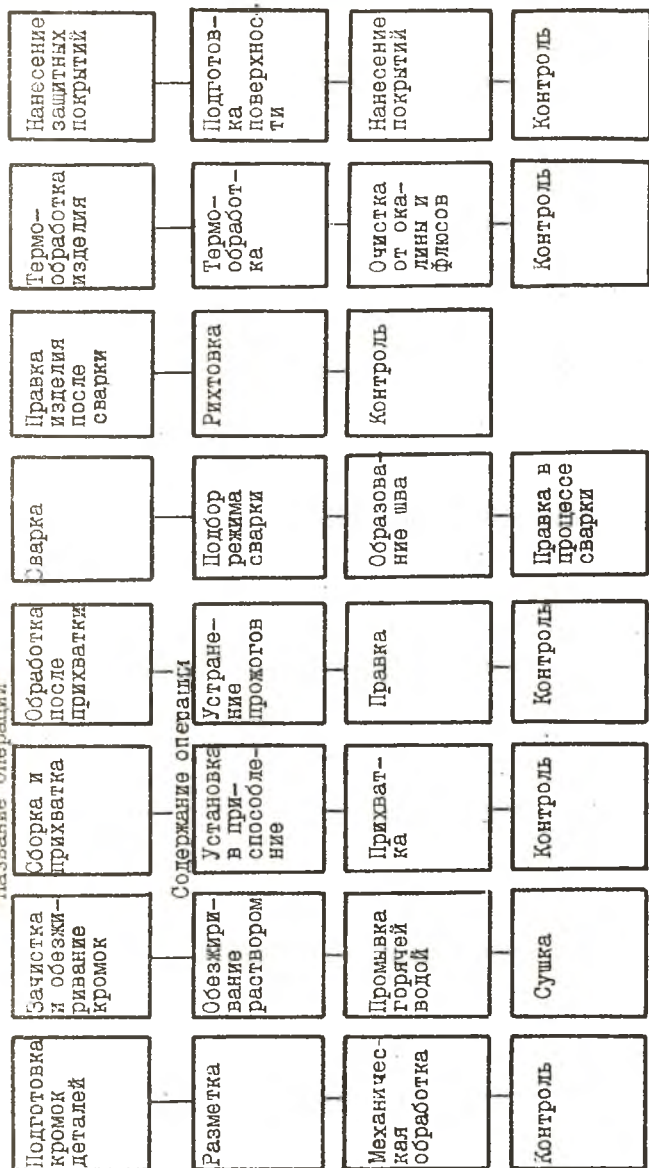
Сборочно-сварочная оснастка подразделяется на стандартизованную, универсально-сборочную и специальную. Сварочные позиционеры используются для закрепления и поворота заготовок в удобное для сварки положение. Сварочные вращатели и перемещатели предназначены для вращения и перемещения изделий вокруг постоянной оси со скоростью сварки. Сварочные манипуляторы предназначены для вращения изделия при сборке и сварке с различными углами наклона оси вращения.

Одним из основных преимуществ дуговой сварки являются простота сварочного оборудования и возможность механизации и автоматизации процесса. Дуговая сварка может проводиться двумя способами: неплавящимся электродом из вольфрама — соединение металла толщиной 0,1...4,0 мм выполняется как с присадкой, так и без присадки; плавящимся металлическим электродом получают соединения металла от 2 мм и более.

Сварка осуществляется в свободном состоянии или в приспособлении. Автоматическая и механизированная сварка производится только в приспособлении.

Ручная сварка, имеющая только одно преимущество — простоту приспособлений и инструмента — и очень много недостатков, среди которых

Название операций



Содержание операций

Р и с. 3.1. Последовательность выполнения основных операций при сварке

низкая производительность, невысокая стабильность качества шва и частые прожоги, в технологии производства лазерных установок и комплексов не применяется.

Автоматическая сварка под флюсом — достаточно высокопроизводительный процесс. Так, по сравнению с ручной дуговой сваркой производительность процесса повышается в 15–20 раз, значительно уменьшается стоимость 1 м сварного шва. Автоматическую сварку под флюсом целесообразно применять в серийном и массовом производстве для выполнения длинных прямолинейных и кольцевых швов при сварке углеродистых и легированных сталей, меди и т.д. Сварка под флюсом имеет следующие недостатки: невозможность наблюдения за горением дуги; сложность обеспечения сварки вертикальных и наклонных швов; необходимость тщательной очистки от оксидов для предупреждения коррозии.

Плазменная сварка находит применение при изготовлении изделий из коррозионно-стойкой стали, неметаллов (стекла, керамики, металло-керамики и др.).

Важное преимущество электронно-лучевой и лазерной сварки — возможность сварки без разделки кромок и глубокой зоны проплавления вследствие ввода минимального количества концентрированного тепла и значительных скоростей охлаждения.

Параметрами технологического процесса сварки давлением являются давление, температура, время, среда, скорость взаимного перемещения соединяемых деталей (при сварке трением и взрывом).

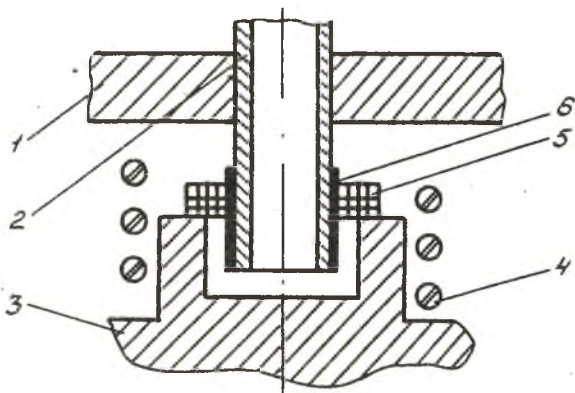
Электрическая контактная сварка — один из высокопроизводительных способов сварки, легко поддается механизации и автоматизации. Разделяют на точечную, шовную (роликковую) и стыковую.

При ультразвуковой сварке используются упругие колебания высокой частоты, разрушающие окисные пленки и способствующие развитию повышенных температур в зоне контакта.

Диффузионная сварка в вакууме происходит вследствие взаимной диффузии атомов контактирующих поверхностей при относительно длительном воздействии в условиях вакуума, повышенных температур и незначительной пластической деформации.

Пайка — процесс соединения материалов с нагревом ниже температур их автономного расплавления путем смачивания, растекания и заполнения зазора между ними жидким припоем и сцепления их при кристаллизации шва. Техпроцесс пайки состоит из следующих основных операций: подготовка поверхности; сборка под пайку; нанесение флюса и припоя; нагрев места спая; промывка и очистка шва и контроль.

По способу нагрева различают пайку: в печах вакуумных и с контролируемой атмосферой, индукционную (рис. 3.2), электросопротивлением, погружением в расплавы припоев, газовыми горелками, паяльниками и концентрированными источниками энергии, например, кварцевыми лампами и электронно-лучевыми и лазерными установками.



Р и с. 3.2. Соединение пайкой трубопровода со штуцером: 1 - зажим; 2 - трубопровод; 3 - штуцер; 4 - нагреватель (индуктор); 5 - припой; 6 - обмазка

Контроль качества сварных и паяных соединений проводится в следующей последовательности:

1. Контроль качества исходных материалов (механические испытания, химические анализы и пробы на свариваемость и паяемость).
2. Контроль качества подготовки деталей (по степени очистки кромок и подгонки контактных поверхностей).
3. Контроль режимов процессов пайки и сварки.
4. Контроль качества швов, их размеров, формы.
5. Контроль герметичности соединений.

Для контроля готового изделия применяются следующие методы: внешний осмотр и обмер швов; магнитный метод контроля; просвечивание швов рентгеновскими или гамма - лучами; ультразвуковой контроль.

Если не соблюдаются условия техники безопасности при сварке и пайке, то вредное влияние может оказать действие световых, ультрафиолетовых и инфракрасных лучей, загрязнение атмосферы пылью, вредными парами и газами, образующимися при плавлении металлов, припоев

и флюсов. Не исключены ожоги от капель металла, припой, шлака и флюсов и возможность поражения электротоком, взрывы и пожары из-за непрерывного обращения с баллонами сжатого газа либо из-за выполнения сварки вблизи легковоспламеняющихся и взрывоопасных веществ.

По конструкции и в технологическом отношении основные части ЛТК значительно отличаются друг от друга, поэтому их изготовление требует специализации производства. Так, проектированием и изготовлением источников излучения занимаются специальные конструкторские бюро и заводы, а проектированием и изготовлением манипуляторов, координатных столов и систем управления – станкостроительные предприятия. На предприятиях, выпускающих ЛТК, наряду с изготовлением и сборкой производится монтаж и проверка в действии лазеров, специального оборудования и прочих агрегатов.

ЛТК состоит из деталей, узлов и агрегатов. Деталь – это элементарная часть изделия (или первичный элемент сборки). Узел – это несколько соединенных между собой деталей. Агрегат – законченная в конструктивном и технологическом отношении часть ЛТК, состоящая из узлов и деталей, например, компрессор, теплообменник и т.д.

В сборочном цехе (отделе) предприятия, выпускающего ЛТК, выполняются следующие виды работ: сборочные, включающие установку деталей в сборочное положение, соединение их в узлы и агрегаты, сборка технологического лазера в целом является завершающим этапом этих работ; монтажные, связанные с установкой контрольных датчиков и приборов, систем управления и различного рода специального оборудования. Объем сборочных и монтажных работ зависит от количества входящих в конструкцию ЛТК деталей и количества устанавливаемых механизмов, приборов и специальной аппаратуры. Технология сборочных работ разрабатывается с учетом свойств материалов, из которых изготавливаются технологические лазеры, и способов соединения деталей между собой.

Разделение агрегатов проводится по конструктивным, технологическим и эксплуатационным стыкам и разъемам. Конструктивные разъемы обусловлены функциональным назначением выделяемых подконструкций. Технологические стыки создаются с учетом возможностей производства на данном этапе его развития и определяются, в частности, габаритными размерами оборудования. Эксплуатационные разъемы и стыки создаются с целью замены, осмотра или регулирования различных механизмов и систем в процессе эксплуатации ЛТК. Для обеспечения эксплуатации и подходов к элементам конструкции и отдельным механизмам на-

вящу с эксплуатационными разъемами делают различные специальные смотровые окна, закрывающиеся крышками. Конструктивные и эксплуатационные разъемы и стыки намечаются при проектировании изделия. Выбор технологических стыков зависит от программы производства, габаритных размеров отдельных агрегатов и способа соединения деталей при сборке узлов и т.д.

Сборка ЛТК организуется по схеме параллельно-последовательных операций, начиная со сборки узлов и кончая общей сборкой. На основе разработанной последовательности сборочных операций составляется схема сборки, которая является одним из основных технологических документов для проведения работ. В схему сборки вносятся указания о порядке комплектования собираемого изделия деталями и узлами, а также технические требования на них, определяющие, в каком виде они подаются на сборку. Высокие требования предъявляются к деталям, входящим в стыковые соединения, так как малейшие их неточности приводят к большим доводочным работам. Технологическая схема сборки, определяя ее порядок, является в то же время и основным исходным документом для разработки технологических требований на сборочные единицы — детали, узлы и агрегаты.

При сборке ТЛ и ЛТК различают следующие ее основные виды: узловая, агрегатная и общая. Объем сборочных работ определяется конструкцией ЛТК, физико-механическими свойствами материалов, из которых изготовлен комплекс, и видами заготовок, из которых изготовлены отдельные детали и узлы. Трудоемкость сборочных работ для технологических комплексов на базе СО<sub>2</sub>-лазеров мощностью 1...5 кВт составляет от 40 до 60% общей трудоемкости при изготовлении. В том числе: узловая сборка — до 25%; агрегатная сборка — до 20%; общая сборка — до 15%. Объем отдельных видов сборочных работ зависит от глубины проработки технологического процесса сборки, степени оснащения сборочных работ необходимым оборудованием и инструментом и качества поступающих на сборку деталей.

Существует несколько методов сборки, отличающихся видом применяемого при сборке инструмента, сборочных приспособлений и оборудования. Наибольшее распространение получили сборка по базовой детали, разметке, сборочным отверстиям и сборка с применением специальных сборочных приспособлений.

Сборка по базовой детали — процесс, при котором одну из деталей принимают за базовую и к ней в определенной последовательности присоединяют другие детали, входящие в собираемый узел. При высоком ка-

честве изготовления деталей узел или агрегат собирается быстро, так как не требуется подгонка и доработка деталей. По базовой детали, как правило, изделия собираются в простейших приспособлениях, которые удерживают собираемый узел или агрегат и поворачивают его в удобное для сборщика положение, например, при сборке пневматического затвора  $CO_2$ -лазерной установки.

Сборка по разметке — процесс, при котором взаимное положение деталей, входящих в узел, определяют непосредственно измерением расстояний между ними и по рискам, нанесенным на деталях при разметке. Сборка по разметке производится при помощи универсальных слесарных инструментов и приспособлений (струбцин, чертилки, керны, метра, циркуля, ручных и настольных тисков и т.д.). Детали, поступившие на сборку, размечают вручную или фотоконтактным методом (по специальным шаблонам).

Процесс сборки по разметке включает много переходов, связанных с разметкой центров отверстий в каждой детали, кернением положения центров, измерением расстояний между деталями, установкой и снятием струбцины, например, при установке смотрового окна, анодной плиты быстродействующего лазера.

Сборка по сборочным отверстиям — процесс, при котором взаимное расположение собираемых деталей определяется положением имеющихся на них сборочных отверстий. При базировании по сборочным отверстиям собираемые детали совмещают друг с другом, и на период соединения деталей в сборочные отверстия вставляют фиксаторы. Сборка с базированием по сборочным отверстиям плоских узлов производится на столах или с применением простейших приспособлений, которые в этом случае служат для поддержания деталей в сборочном приспособлении и не оказывают влияния на точность образования форм и обводов изделия. Сборочные отверстия в деталях сверлятся при изготовлении деталей по шаблонам (плоским и объемным), по разметке, фотоконтактным методом или в приспособлениях для сверления, например, в корпусе технологического лазера.

Сборочные приспособления обеспечивают требуемое взаимное положение собираемых деталей, определенное положение обрабатывающего инструмента относительно детали, придание формы недостаточно жестким деталям и узлам в процессе сборки. По сравнению со сборкой по разметке сборка в приспособлениях имеет следующие преимущества: исключается разметка и пригонка деталей; ускоряется и облегчается процесс сборки; достигается взаимозаменяемость собираемых узлов и агрегатов.

возможна механизация процесса сборки. Применение сборочных приспособлений целесообразно в серийном производстве.

Сборка по базе "поверхность каркаса" как специфический способ базирования, применяемый в двигателе-, автомобиле- и самолетостроении. Находит применение при серийном изготовлении технологических лазеров. При такой сборке агрегаты или детали корпуса устанавливаются на поверхность каркаса и прижимаются к ней на период выполнения соединения. Как правило, это клеевое или паяное соединение, может применяться точечная сварка, сварка давлением.

Сборка по базе "поверхность корпуса" проводится следующим образом. Корпус прижимается к опорным поверхностям приспособления на период соединения. Для установки существуют два этапа - предварительный и окончательный. Соединяемые поверхности предварительно накладывают на базовую поверхность макета. В таком положении по направляющим отверстиям в компенсаторах сверлят отверстия под болтовое или заклепочное соединения. Окончательный этап - соединение.

Для сборки с базированием по координатно-фиксирующим отверстиям детали поступают с просверленными в них координатно-фиксирующими отверстиями, такие же отверстия имеются в элементах сборочного приспособления. Детали устанавливают в приспособление и фиксируют по отверстиям фиксаторами и соединяют между собой накладками при помощи болтов. На подготовленный таким образом каркас устанавливают другие детали, прижимая их силой к каркасу. Далее производят соединение прижатых деталей.

Чем точнее изготовлены детали - тем легче их собирать. Т.е. изготовление с высокой точностью взаимозаменяемых деталей является одной из основных задач производства, его заготовительных и механических подразделений. Поэтому к деталям, поступающим на сборку, предъявляются следующие основные требования:

#### По взаимозаменяемости

1. Соответствие в пределах установленных допусков фактических размеров детали ее размерам по чертежу.
2. Воспроизведение требуемого по чертежу рельефа и формы.
3. Правильность положения сборочных, направляющих и базовых отверстий относительно базовых осей контура.

#### По прочностным и эксплуатационным характеристикам

1. Использование материалов требуемых марок, выполнение условий термообработки, обеспечение требуемого качества поверхности.
2. Применение заданных антикоррозионных и декоративных покрытий.

## По специальным требованиям, оговариваемым в чертежах

1. Выдерживание заданных зазоров между склеиваемыми или герметизируемыми поверхностями.

2. Сохранение перпендикулярности всех отверстий для стыковых болтов к торцу соединяемых поверхностей.

Требования к деталям, поступающим на сборку, разрабатывают после того, как сделан выбор методов базирования и составлены согласованные с соответствующими подразделениями схемы сборки агрегатов и узлов.

## 4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

Существуют четыре основные группы диэлектрических кристаллических материалов, применяемых для изготовления активных элементов твердотельных лазеров: простые оксиды, например, кристаллы рубина  $Al_2O_3$ , легированного ионами  $Cr^{3+}$  в количестве 0,01–0,5%; двойные оксиды редкоземельных материалов – соединения типа  $Ln_2O_3$ , где  $Ln$  – редкоземельный элемент (скандий, итрий, диспрозий, гольмий и т.д.), сравнительно редко встречающиеся в лазеростроении из-за неудовлетворительных характеристик генерации и дороговизны; бинарные системы на основе оксидов алюминия и редкоземельных элементов (гранаты) – системы типа  $Ln_2O_3-Al_2O_3$ , наиболее распространенные в технике твердотельных лазеров; фторидные системы – фторид кальция и т.д.

### 4.1. Методы выращивания твердотельных диэлектрических лазерных монокристаллов

Спектр методов получения диэлектрических лазерных кристаллов достаточно широк: кристаллизация из расплава, из раствора, гидротермальный синтез, выращивание из газовой фазы, метод жидкофазной эпитаксии. Более половины технически ценных монокристаллов изготавливаются методом кристаллизации из расплава.

Кристаллизация из расплава сопровождается рядом физико-химических процессов, среди которых выделяют четыре основные группы:

1. Процессы, влияющие на состав расплава: термическая диссоциация исходного вещества, его химическое взаимодействие с окружающей средой, испарение продуктов диссоциации и примесей, содержащихся в расплаве.

2. Процессы во фронте кристаллизации, определяющие кинетику фазового перехода.

3. Процессы теплопереноса, определяющие распределение температуры в кристалле и расплаве.

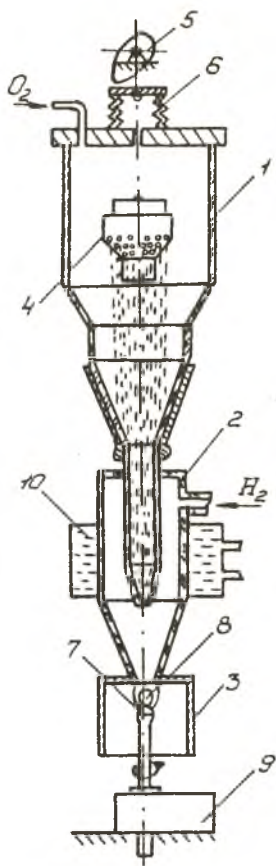
4. Процессы массопереноса и, в особенности, перенос примесей, обусловленный конвекцией и диффузией в расплаве.

Методы выращивания монокристаллов из расплава разделяют на две группы: методы с малым объемом расплава (наиболее распространенный – метод Вернейля), методы с большим объемом расплава (методы Чохральского, Богдарасова и т.д.).

Величина объема расплава влияет на характер и интенсивность ряда физико-химических процессов, происходящих в нем. Расплавленное вещество может подвергаться диссоциации, а продукты диссоциации – испаряться в атмосферу. Для обеих групп характерно и различие условий конвекции: в малом объеме конвекция часто не учитывается, тогда как в большом объеме осуществляется активный перенос вещества методом конвекции.

Наиболее распространенный метод выращивания, названный по имени автора – К. Вернейля, впервые в истории синтезировавшего корунд, до 50-х годов применялся для выращивания рубинов и шпинелей для приборостроения и ювелирного дела. Классическая схема установки Вернейля представлена на рис. 4.1.

Печь состоит из двух трубок: 1 и 2. Через трубку 1 поступает кислород, который смешивается с водородом, поступающим в трубку 2. В нижней, сужающейся части трубки 2 смесь газов поджигается при запуске печи. В поддерживаемое пламя, огражденное огнеупорным экраном 3, подается мелкий порошок оксида алюминия из контейнера 4 под действием равномерных ударов эксцентрика 5 по сильфону 6, к сильфону 6 гибко прикреплен контейнер 4.



Р и с. 4.1. Схема установки Вернейля для выращивания монокристаллов, применяемых для изготовления активных элементов твердотельных лазеров: 1-трубка для подачи кислорода; 2-трубка для подачи водорода; 3-огнеупорный экран; 4-контейнер; 5-эксцентрик; 6-сильфон; 7-подставка из плавящегося оксида алюминия; 8-кристалл; 9-механизм вращения и перемещения кристалла; 10-водяная рубашка

Попадая в пламя, порошок плавится и жидкость перетекает на подставку 7 из плавленного оксида алюминия. Кристалл, получаемый на подставке в процессе работы печи, традиционно носит название булька (от французского *boule* – шар). По мере нарастания булька 8 опускается вместе с подставкой 7 специальным механизмом 9. Во избежание перегрева трубка 2 помещена в водяную рубашку 10.

Метод Вернейля достаточно прост, не требует специального контейнера, исключает взаимодействие расплава с металлом и механическое давление стенок контейнера на бульку. Имеется возможность кристаллизации на воздухе, что позволяет использовать окислительно-восстановительный потенциал атмосферы. Метод технически прост, имеется возможность наблюдения за ростом кристаллов.

Недостатки метода: сложность подбора оптимального соотношения скорости опускания затравки, подачи шихты и расхода рабочих газов; высокие требования к чистоте рабочих газов; высокие градиенты температур в зоне роста кристалла и, как следствие – большие внутренние температурные напряжения; недостаточная равномерность подачи шихты в зону роста; ограниченность температуры пламени не позволяет получать тугоплавкие кристаллы; часть шихты проносится газом мимо бульки.

Применяется ряд усовершенствований классического способа Вернейля. Так, вместо подачи окиси алюминия в виде порошка в зону горения подается смесь трех газов: паров хлористого аммония, углекислого газа и водорода. В результате взаимодействия образуется оксид алюминия. Этот способ усложняет конструкцию печи, но делает бульку почти идеально однородной.

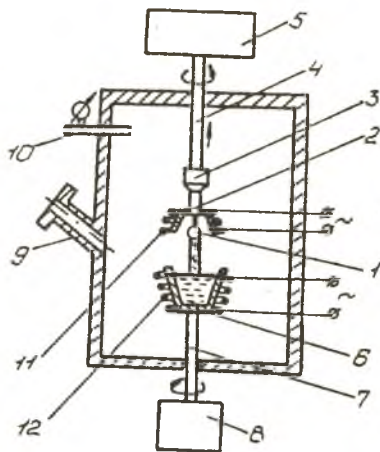
Кислородно-водородный факел заменяют высокочастотным газовым безэлектродным разрядом, наводимым индуктором. Такая установка практически не имеет температурных ограничений, а ее недостаток – недостаточная устойчивость газового разряда. В качестве высокостабильного источника нагрева возможно применение мощного технологического лазера.

Рассмотренный метод является одним из основных и прогрессивных методов получения лазерных монокристаллов, таких как рубин, рубин в лейкосапфировой оболочке, некоторые кристаллы фторидов, например, флюорит.

Монокристаллы оксидных соединений с температурой плавления до 3000 К с высокой степенью структурного совершенства выращивают методом Чохральского. Схема метода представлена на рис. 4.2.

Монокристаллическая затравка I закрепляется в свече 2, помещенной в цанговый держатель 3 водоохлаждаемого вала 4. Вал 4 соединен с

механизмом вращения и перемещения 5. Исходная смесь загружается в иридиевый тигель 6, который укреплен на водоохлаждаемом вале 7, связанном с механизмом вращения и перемещения 8 тигля 6. Наблюдение за процессом кристаллизации ведется через смотровое окно 9. Откачка и напуск газа осуществляются через специальный ввод 10. Нагрев тигля и заправки осуществляется индукционными нагревателями II и I2, связанными с высокочастотными генераторами. Для сглаживания асимметрии температурных полей и лучшего перемешивания расплава заправка I и тигель 6 вращаются в противоположные стороны.



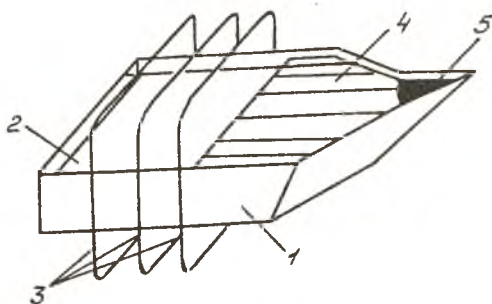
Р и с. 4.2. Схема установки Чохрального для выращивания монокристаллов: I — монокристаллическая заправка; 2 — свеча; 3 — цапговый держатель; 4, 7 — водоохлаждаемые валы; 5, 8 — механизмы вращения и перемещения; 6 — иридиевый тигель; 9 — смотровое окно; 10 — механизм откачки и напуска газа; II, I2 — индукционные нагреватели

Преимущества метода: отсутствие прямого контакта между стенками тигля и кристаллом; возможность извлечения кристалла из печи на любом этапе выращивания; возможность изменения гесметрической формы кристаллов при варьировании температуры расплава и скорости вращения тигля и заправки; возможность автоматизации процесса. Линии из 20-30 таких установок, работающие под контролем одного рабочего, производят стержни алкмоитриевого граната диаметром от 0,5 до 20 мм со скоростью 10 мм/ч. Метод Чохрального — основной промышленный метод получения алкмоитриевого граната.

Недостатки метода: трудность создания заданных градиентов температуры в зоне кристаллизации без существенного перегрева стенок контейнера; необходимость использования дорогостоящего иридия делает печь дорогой; велика опасность загрязнения расплава частицами материала тигля. Перспективно применение лазерного нагрева.

Кристаллы алкмоитриевого граната получают и методом горизонтально направленной кристаллизации (метод Богдасарова). Схема метода представлена на рис. 4.3.

В контейнер I загружают шихту 2 в виде порошка, расплавляют ее и перемещением контейнера через нагреватель 3 закристаллизуют



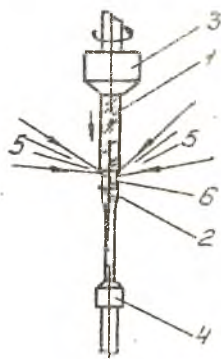
Р и с. 4.3. Схема метода горизонтально направленной кристаллизации: 1 - контейнер; 2 - шихта; 3 - нагреватель; 4 - кристаллы; 5 - затравка

возможности проведения многократной перекристаллизации вещества, выращивания монокристаллов различных геометрических форм и осуществления непрерывного процесса выращивания кристаллов.

Метод оптической зонной плавки позволяет выращивать высокотемпературные соединения в любой атмосфере, получать серии кристаллов, легированные различными примесями, имеет высокий уровень автоматизации и не требует дорогостоящих тигельных материалов (иридия, платины). Недостатки метода: ограниченность диаметра выращиваемых кристаллов, большие температурные градиенты. Схема метода представлена на рис. 4.4.

Цилиндрический стержень из прессованного материала 1 и монокристаллическая затравка 2 закрепляются вертикально в цанговых пержате-лях 3 и 4. Расплавленная зона создается фокусированным эллиптическим излучением ксеноновой лампы, например, ДСКР-6000. Излучение 5 подается в зону 6 высоких температур. Прессованный стержень 1 медленно вводится в зону высоких температур 6 и на его конце создается капля расплавленного материала. После получения капли к ней снизу до соприкосно-

раслав в кристалл 4. Для получения строго ориентированного кристалла в вершину контейнера устанавливается затравка 5. Имеется возможность визуального наблюдения за моментом затравления и формой фронта кристаллизации. Открытая поверхность позволяет вводить в расплав активирующую примесь на любом этапе выращивания монокристалла. Основные преимущества метода:



Р и с. 4.4. Схема метода оптической зонной плавки: 1-прессованный материал; 2-монокристаллическая затравка; 3,4-цанговые держатели; 5-излучение; 6-зона высоких температур

вения подводится монокристаллическая затравка 2. Создается зона расплавленного материала, удерживаемая силами поверхностного натяжения. Провигая всю систему относительно зоны 6, через нее перемещают весь стержень I. Осуществляют вращение стержня I совместно с затравкой 2.

В таких установках используются газоразрядные лампы высокого давления (ксеноновые, аргоновые и др.) и эллиптические отражатели из тугоплавких металлов.

Существуют условия, не позволяющие выращивание лазерных монокристаллов из расплава: получаемое вещество неустойчиво при высоких температурах; большие термические напряжения в кристалле; примесь характеризуется повышенной летучестью при расплавлении материала. В этих случаях применяется выращивание диэлектрических лазерных кристаллов из высокотемпературных растворов. При выращивании монокристаллов на затравках нагрев осуществляется ролевой спиралью, обеспечивающей температуру до  $1500^{\circ}\text{C}$ , нечь автоматически термостабилизируется. Существует два основных способа: медленное снижение температуры (скорость охлаждения  $\sim 0,5$  град/ч в интервале температур от  $1300^{\circ}\text{C}$  до  $1000^{\circ}\text{C}$ ) и перенос вещества из более нагретой зоны в менее нагретую при постоянном температурном градиенте.

Метод выращивания на затравках наряду с преимуществами (относительная простота установок, малая энергоемкость и возможность автоматизации процесса) имеет ряд серьезных недостатков: длительный срок роста кристаллов при сравнительно небольших их размерах, дороговизна оборудования за счет использования большого количества таких материалов, как платина, рений, палладий, золото в качестве катализаторов. Дефектность кристаллов, выращенных из раствора, выше, чем у кристаллов, полученных из расплава.

Другие способы получения монокристаллов: гидротермальный синтез, выращивание из газовой фазы, из пленок — либо совсем не используются в промышленном получении кристаллов активных элементов лазеров, либо используются в очень незначительной мере.

#### 4.2. Механическая обработка кристаллов для активных элементов твердотельных лазеров

С точки зрения непрерывности протекания процессы обработки оптических деталей разделяют на три класса.

I. Процессы, осуществляемые на машинах дискретного действия и предусматривающие строгую цикличность прохождения элементов выполняемой операции: закрепление заготовки, подвод инструмента, обработка,

смена инструмента и др. После окончания обработки одной детали весь цикл повторяется. При обработке на машинах дискретного действия велико время на выполнение холостых ходов (закрепление и съем заготовки, подвод и отвод инструмента и пр.).

2. Процессы, выполняемые на машинах непрерывного действия. В этом случае инструмент в процессе обработки занимает постоянное положение, а заготовки непрерывно перемещаются. Процессы этого класса характеризуются высокой производительностью и возможностью сравнительно легкой автоматизации.

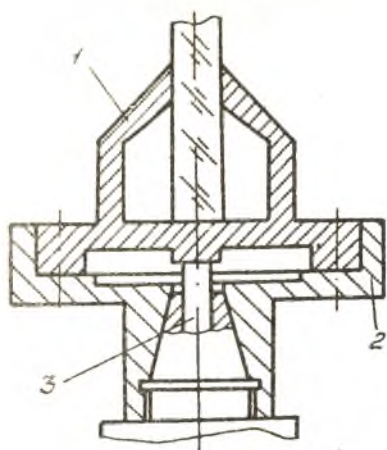
3. Процессы обработки, осуществляемые на машинах квазинепрерывного действия во время транспортировки заготовки от позиции загрузки к позиции разгрузки. Комплексные технологические процессы, включающие механическую и термическую обработку деталей, сборку и контроль, сравнительно легко автоматизируются.

Для получения активных элементов твердотельных лазеров из кристаллов или стекол проводят механическую обработку, достигая необходимых размеров и качества поверхностного слоя. Отклонения размеров и формы не должны превышать  $0,001...0,003$  мм, а шероховатость поверхности не более  $R_a = 0,005...0,025$  мкм. Для разрезания, шлифования и полирования активных элементов твердотельных лазеров может применяться как традиционное оборудование, применяемое в производстве точных оптических деталей, так и оборудование повышенной точности с принципиально иной конструкцией шпиндельного узла на аэродинамических опорах.

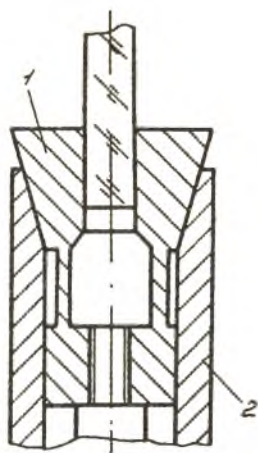
Заготовки обрабатывают на станках поштучно или наклеенными приспособлениями. Конструкция устройств должна обеспечивать быструю и надежную фиксацию деталей без повреждения и деформации их рабочих поверхностей. Наибольшее распространение для крепления одиночных деталей типа активных элементов для твердотельных лазеров получили мембранные патроны.

Мембранный патрон, представленный на рис. 4.5, состоит из корпуса 2, закрепленного на шпинделе станка, и мембраны с разжимной цангой I. При нажатии штока 3 на мембрану губки цанги расходятся и диаметр посадочного пояса цанги увеличивается. В этот момент в цангу укладывается заготовка. После снятия усилия штока губки цанги сжимают деталь по диаметру цилиндра.

На рис. 4.6 представлена конструкция другого широко применяемого зажимного устройства — цангового зажима. Продольные прорезы превращают каждый лепесток цанги I в консольно закрепленную балку, которая получает радиальные упругие перемещения при продольном движении



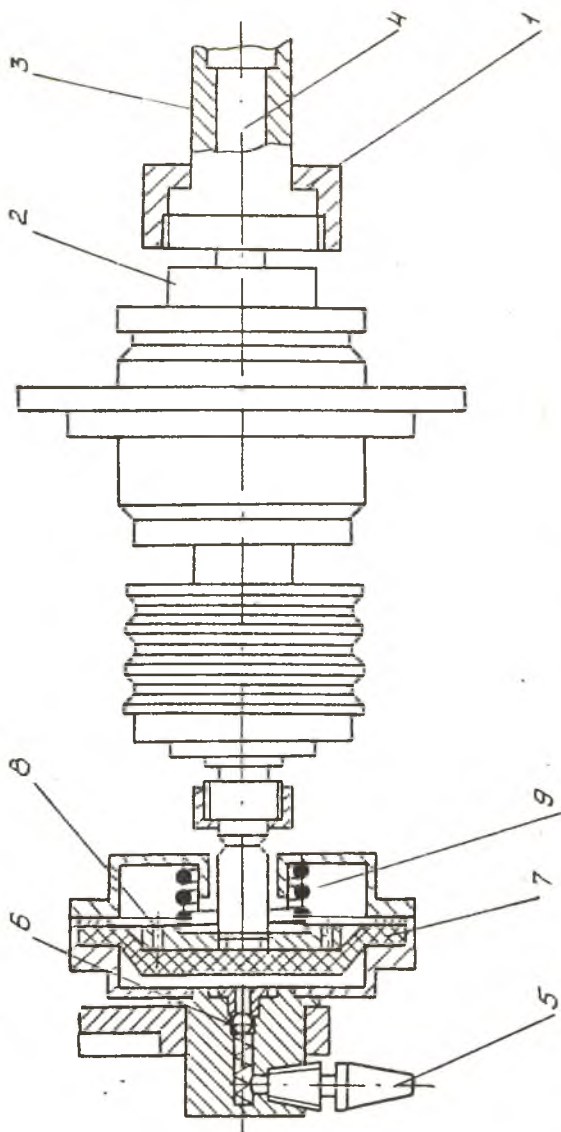
Р и с. 4.5. Мембранный патрон:  
1 - цанга; 2 - корпус; 3 - шток



Р и с. 4.6. Цанговый зажим: 1 - цанга; 2 - корпус

цанги за счет взаимодействия конусов цанги и корпуса 2. Так как радиальные перемещения всех лепестков цанги происходят одновременно и с одинаковой скоростью, то механизм приобретает свойства самоцентрирования. Число лепестков цанги зависит от рабочего диаметра  $d$  и профиля зажимаемых заготовок. При  $d \leq 30$  мм цанга имеет три лепестка, при  $30 < d < 80$  мм - четыре. Для сохранения работоспособности цанги деформация ее лепестков не должна выходить за пределы упругой зоны. Это определяет повышенные требования к точности базового диаметра заготовки, который должен быть выполнен не грубее 7 качества.

На рис. 4.7 представлен пневматический привод зажимных устройств. На резьбовой конец шпинделя 2 с помощью гайки 1 посажено зажимное устройство с заготовкой 3, в центральное отверстие шпинделя помещен шток 4. После останова вращения через штуцер 5 и обратный клапан 6 во внутреннюю полость привода подается сжатый воздух. Эластичная диафрагма 7 под действием давления воздуха перемещает шайбу 8 с пальцем вверх, конец пальца упирается в нижний конец штока и через него воздействует на мембрану или цангу зажимного устройства. Губки мембраны или лепестки цанги разжимаются, высвобождая заготовку. При снятии давления воздуха эластичная диафрагма под действием пружины 9 возвращается в исходное положение - патрон сжимает заготовку. Пневматический привод крепится к неподвижному основанию станка.



Р и с. 4.7. Привод зажимного устройства: 1 — гайка; 2 — штибель; 3 — заготовка; 4 — шток; 5 — штуцер; 6 — клапан; 7 — диафрагма; 8 — шайба; 9 — пружина

Наиболее важными параметрами при обработке активных элементов для твердотельных лазеров, как и при обработке других оптических элементов, являются температура детали, плавление в установке, влажность и запыленность окружающей среды.

Для контроля температуры применяют жидкостные термометры, в том числе электрические контактные; пирометры излучения – оптические и радиационные; биметаллические и dilatационные термометры; манометрические термометры – жидкостные, конденсационные и газовые.

Приборы для измерения положительного избыточного давления называются манометрами, для измерения отрицательного избыточного давления (вакуума) – вакуумметрами. Комбинированные приборы для измерения положительного и отрицательного избыточных давлений – мановакуумметры.

По принципу действия приборы для измерения давления и разрежения подразделяются на следующие типы: жидкостные, в которых давление уравнивается высотой столба жидкости; пружинные, в которых давление уравнивается силой упругой деформации чувствительного элемента; поршневые, в которых давление уравнивается силой, действующей на поршень определенного сечения; комбинированные, принцип действия которых имеет смешанный характер; электрические, в которых используется изменение ЭДС термопары, явление электрического разряда и изменение ионизации газа.

Проводится контроль состояния окружающей среды. Абсолютную влажность воздуха при положительной температуре окружающей среды измеряют психометрами, при отрицательной – гигрометрами. Для определения запыленности воздуха и технологических газов, проверки эффективности работы технологических воздушных и газовых фильтров, определения концентрации аэрозолей, нахождения источника загрязнения применяются анализаторы запыленности, принцип работы которых основан на рассеивании света измеряемыми аэрозольными частицами.

#### 4.3. Сборка квантрона твердотельного лазера

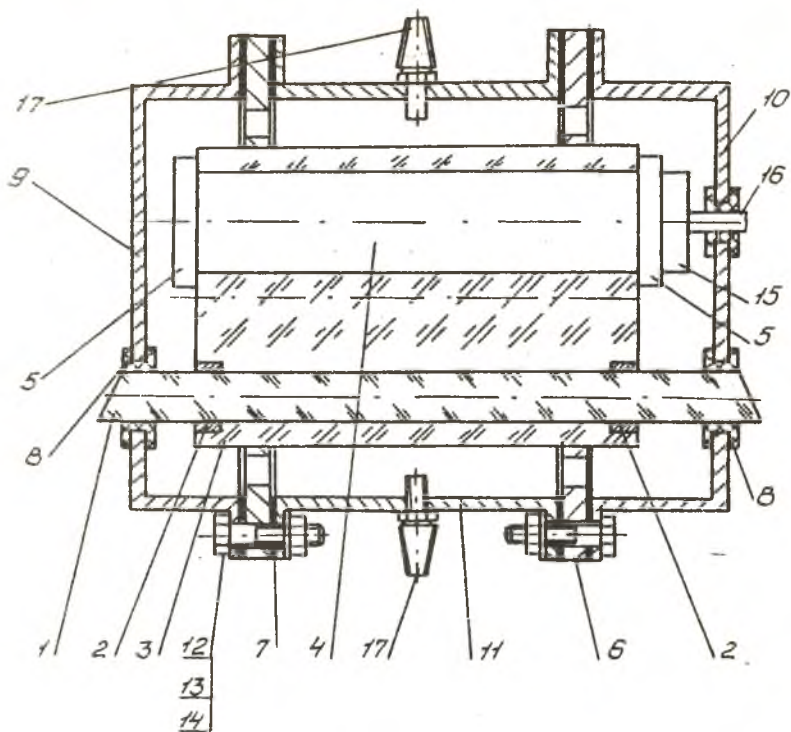
В зависимости от характера материала собираемых деталей сборка оптических приборов делится на механическую (сборка деталей из металлов) и оптическую, когда соединяют оптические детали друг с другом и металлические детали с оптическими. По назначению сборочный процесс разделяется на предварительную сборку и окончательную сборку. К предварительной сборке относят соединение отдельных деталей в узлы. Окон-

чательная сборка представляет собой процесс соединения механических и оптических узлов в готовый прибор.

В зависимости от методов обеспечения заданной точности сборки сборочные процессы разделяются на три вида. Первый вид сборки — это сборка по принципу полной или ограниченной взаимозаменяемости. Сборка по принципу полной взаимозаменяемости основана на том, что предписанные требования к узлу, прибору достигаются простым соединением деталей без пригонок, компенсации и т.п. Под сборкой с ограниченной взаимозаменяемостью понимают сборку, основанную на принципе полной взаимозаменяемости, но только в пределах одного предприятия или группы предприятий. Второй вид сборки — это селективная сборка с групповым подбором и с индивидуальным подбором. В первом случае проводится предварительная сортировка и группировка деталей в пределах равных интервалов допусков. Селективная сборка с индивидуальным подбором осуществляется путем обмера деталей с последующей сборкой узла и путем подбора деталей с получением заданной точности сопряжения. Третьей разновидностью сборки является сборка с компенсацией: сборка с конструктивной компенсацией и сборка с технологической компенсацией. Сборка с конструктивной компенсацией основана на выполнении регулировки размерных звеньев путем специальных конструктивных элементов, введенных в узлы. Под технологической компенсацией понимается проведение результативной обработки деталей и узлов, находящихся уже в собранном виде, а также технологическая пригонка деталей и узлов непосредственно в сборке (припиловка, пришлифовка сборочных баз).

На рис. 4,8 представлен общий вид квантрона твердотельного лазера.

При сборке активный элемент 1 устанавливается с натягом по втулкам 2 из меди, запрессованным в эллиптическое зеркало 3, изготовленное из стекла или кварца шлифованием до шероховатости, соответствующей 12–13 классу. В качестве отражающего покрытия может использоваться латунная или алюминиевая фольга, но наиболее эффективным является способ получения отражающего покрытия путем вакуумного напыления сначала слоя никеля, а затем меди в качестве защитного слоя. Оба слоя имеют толщину до 100 мкм. Лампа — вспышка 4 устанавливается в отражатель 3 по свободной посадке, фиксация ее осуществляется специальными фланцевыми держателями 5. В корпусе отражатель удерживается с помощью колец 6. Резиновые прокладки 7 служат для герметизации корпуса. Крышки 9 и 10 соединяются с цилиндром 11 болтами 12, шайбами 13 и гайками 14. Крышки и цилиндр выполняются штамповкой из алюминиевых листов. Резиновые шайбы 8 герметизируют соединение активного



Р и с. 4.8. Общий вид квантрона твердотельного лазера: I - активный элемент; 2 - втулки; 3 - эллиптическое зеркало - отражатель; 4 - лампа вспышки; 5 - фланцевые держатели; 6 - кольца; 7 - резиновые прокладки; 8 - резиновые шайбы; 9, 10 - крышки; II - цилиндр; 12 - болт; 13 - шайба; 14 - гайка; 15 - герметичный штекер; 16 - провод; 17 - штуцер подвода охлаждающей жидкости

элемента и крышек. Соединение лампы вспышки 4 с источником питания осуществляется посредством герметичного штекера 15 и провода 16. Штуцеры 17 служат для подвода в квантрон охлаждающей жидкости.

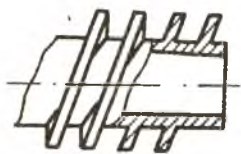
## 5. ПРОИЗВОДСТВО АГРЕГАТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ

### 5.1. Изготовление теплообменных аппаратов

К теплообменникам ТЛ для обеспечения стабильной температуры газа на входе в зону возбуждения предъявляются следующие требования: высокая надежность гидравлических соединений и других элементов конструкции; исключение попадания хладагента в рабочую смесь лазера; минимальное гидравлическое сопротивление потоку рабочей смеси; минимальная температура рабочей смеси на выходе из теплообменника; минимальные габаритные размеры; простота и технологичность конструкции; надежность, отсутствие необходимости профилактического обслуживания.

Широкое применение в ТЛ нашли различные типы теплообменников с развитыми теплообменными поверхностями (оребрение трубок, пластинчато-ребристые поверхности и т.п.). Использование развитых поверхностей позволяет увеличить эффективность теплообмена, значительно снизить вес и уменьшить габариты.

Непрерывное спиральное оребрение трубки теплообменника, представленной на рис. 5.1, получают либо пластической деформацией металла



Р и с. 5.1. Трубка теплообменника с непрерывным спиральным оребрением

толстостенной трубки – заготовки, либо пайкой, сваркой или запрессовкой в спиральной канавке на наружной поверхности трубки навитой на ребро ленты. Так как при выполнении ребер из ленты возможно появление дополнительного термического сопротивления в местах их присоединения к поверхности трубки, наиболее целесообразно применение пластической деформации.

Высокие ребра получают деформацией пластичных металлов – меди, алюминия и некоторых его сплавов, при этом оребренная поверхность в 5–18 раз превосходит поверхность гладкой трубки. Низкие ребра (до 3,5 мм) изготавливают методом накатки аналогично накатке резьбы, например, на стальных трубках – заготовках.

Для проволочного оребрения трубки, представленной на рис. 5.2, обычно используется медная или стальная проволока диаметром 0,5... 0,7 мм, положение петель по винтовой линии на наружной поверхности гладкой латунной или стальной трубки фиксируется бандажной проволокой. Одновременно с навивкой петель вместе с бандажной проволокой на поверхность гладкой трубы навивается припой марки ПОС-18 (припой со-

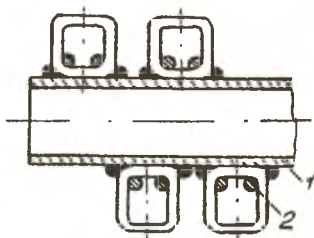
пержит 18% олова, остальное – свинец) в виде проволоки диаметром 1,0...1,8 мм. Трубка с навитой проволочной спиралью погружается в ванну с флюсом, а затем помещается в приспособление для пайки. При использовании медной проволоки наружная поверхность латунных трубок подвергается механической очистке от слоя окислов, а пайка ведется с применением канифоли. При использовании стальной проволоки наружная поверхность латунных или стальных трубок лудится припоем ПОС-18; пайка кислая, после которой оребренная трубка промывается.

Навивка проволочной спирали на наружную поверхность гладких трубок, закрепление ее бандажной проволокой и размещение припоя механизированы и выполняются с помощью специальной головки, которая устанавливается на универсальном токарно-винторезном станке. Трубки выпускаются в следующих вариантах: латунные с оребрением из медной проволоки, латунные и стальные с оребрением из стальной проволоки, длина их составляет от 500 до 3500 мм.

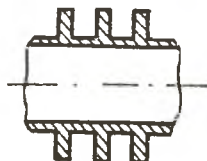
Прямые продольные ребра (рис. 5.3) для турбулизации пограничного слоя приваривают к стальным трубкам на специальных сварочных автоматах. Ребра на поверхности труб из пластичных металлов, например, алюминия и его сплавов образуются при протягивании толстостенной трубы через специальные калибрующие оправки.



Р и с. 5.3. Трубка с продольными ребрами



Р и с. 5.2. Трубка с проволочным оребрением: 1 – трубка; 2 – бандажная проволока

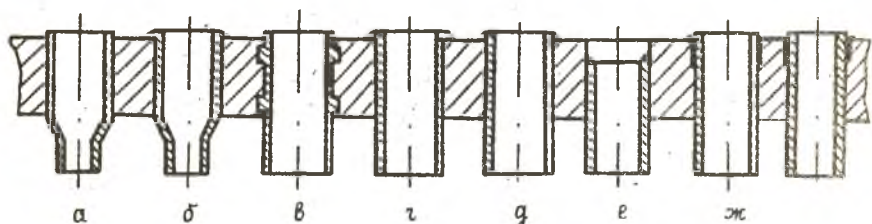


Р и с. 5.4. Оребренная трубка для витых ТА

Прокатка оребренных трубок в винтовых поперечно-точных теплообменных аппаратах (ТА) (рис. 5.4) проводится в специальном приспособлении, устанавливаемом на шпинделе универсального токарно-винторезного станка.

Оребренная медная трубка после отжига легко навивается на сердечник диаметром 40 мм и более. Приспособление рассчитано на прокатку медной трубы – заготовки размером 8х1,5 мм со скоростью 15...20 м/ч, длина оребренных трубок – до 20 м.

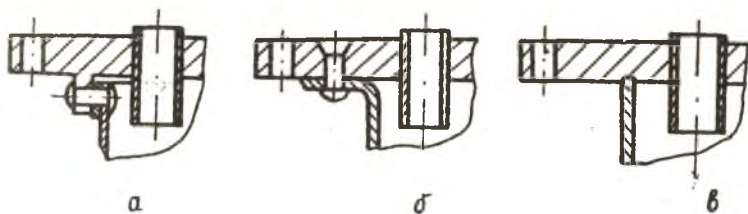
Способ закрепления труб в плитах должен обеспечивать плотность соединения и возможность легкой замены дефектной трубы. Наиболее распространенным способом закрепления труб является развальцовка, применяемая для стальных, медных, латунных и алюминиевых труб. Различные конструктивные оформления развальцовки показаны на рис. 5.5. Наиболее надежно закрепление в.



Р и с. 5.5. Способы крепления труб в трубных плитах: а, б, в – развальцовка; г, д, е – электросварка; ж – заливка оловом

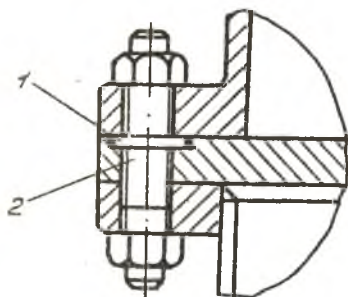
Предоставляющий высокую надежность соединения способ закрепления труб электросваркой применяется редко, так как электросварка тонкостенных труб достаточно затруднительна, затруднительна и смена труб (рис. 5.5). В теплообменниках для низких температур медные трубы небольшого диаметра (меньше 10 мм) закрепляются в бронзовых плитах путем заливки оловом выступающих концов труб (рис. 5.5). Трубные плиты изготавливаются чаще всего из листовой стали, стального литья, бронзы и др. Толщина трубных плит составляет обычно 15...35 мм. Минимальная толщина плиты выбирается из условия надежного закрепления труб развальцовкой. На рис. 5.6 и 5.7 показаны различные способы крепления трубной плиты к корпусу.

Клепкой крепятся плиты из материала, не допускающего сварки с материалом корпуса, например, плиты из бронзы, алюминия к стальному корпусу. Для сварной конструкции (рис. 5,6,в) выступающий край плиты служит фланцем для присоединения камеры или крышки. Применение разъёмного соединения плиты и корпуса теплообменника (рис. 5.7) при двух жестко закрепленных плитах допустимо, если трубы закреплены в сальни-

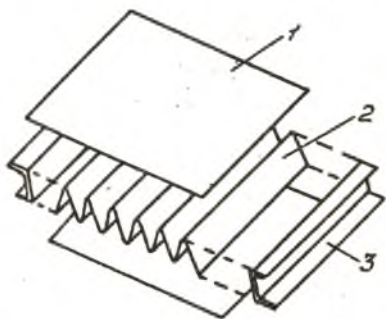


Р и с. 5.6. Неразъемное крепление плиты к корпусу: а, б — клепка; в — сварка

ках; если же трубы закреплены развальцовкой, то смена прокладки между плитой и фланцем невозможна. Для того чтобы вынуть камеру без нарушения связи между плитой и корпусом, часть шпилек выполняют с выступом I и усом 2.



Р и с. 5.7. Разъемное крепление плиты к корпусу: 1 — выступ шпильки; 2 — ус шпильки



Р и с. 5.8. Элементы пластинчатого ТА: 1 — плоский лист; 2 — волнистый лист; 3 — боковое уплотнение

Перегородки ТА технологического лазера изготавливаются из листовой стали толщиной 3...10 мм и крепятся к корпусу или трубчатке.

Сборка пластинчато-ребристого теплообменника, элементы которого представлены на рис. 5.8, проводится следующим образом. На плоский лист металла, толщина которого составляет 0,5...0,8 мм, накладывается дополнительная теплообменная поверхность, сложенная в виде гармошки и изготовленная из металлической полосы толщиной 0,1...0,3 мм. Затем накладывается плоский лист, на него — дополнительная поверхность и т.д. Боковые свободные проходы уплотняются специальными элементами, показанными на рис. 5.8. После сборки нужного числа чередующихся плоских

листов и гофрированных поверхностей в специальном приспособлении осуществляют пайку, в результате чего получается пакет с системой каналов, предназначенных для движения теплоносителей. Возможны различная ориентация каналов и перекрестный ток газов в смежных каналах, а также противоток.

Пайка теплообменников ведется по специально разработанной технологии. При изготовлении теплообменников из алюминия используются листы из сплава типа АМц (алюминий с I-I,5% марганца), плакированные тонким слоем эвтектического силумина. Листы, из которых выполняется развитая поверхность, помещаемая между ограничивающими листами, обычно не плакируются. Пакет собирается в специальном приспособлении, погружается на короткое время в ванну с водным раствором флюса, подсушивается, а затем помещается в печь с регулируемой температурой. Для надежного соединения элементов пакет выдерживается в печи в течение 15-20 мин при температуре 605...610°C. Другой способ пайки - в ваннах с расплавленным флюсом при температуре 510...620°C, которая зависит от применяемого флюса.

Существует оригинальный способ изготовления пластинчатых ТА. На металлическом, например, алюминиевом листе наносится контур каналов. Лист покрывается специальным составом, предотвращающим приставание металла другого листа на этих участках. Затем листы складываются, нагреваются и прокатываются, происходит приварка по всей поверхности, за исключением участков, покрытых защитным составом. После обрезки кромок, в результате которой вскрываются торцы будущих каналов, сваренные листы помещаются между двумя ограничивающими плитами, и каналы расширяются до заданного размера гидравлическим давлением. Такой способ изготовления открывает широкие возможности получения каналов любой формы.

Изготовление пластинчато-стержневого теплообменника, элементы которого представлены на рис. 5.9, проводится следующим образом.

Между двумя ограничивающими пластинами в специальных направляющих пазах размещаются плоские проволочные змеевики; собранный элемент помещается в печь, где происходит расплавление припоя, который после затвердения обеспечивает хороший термический контакт стержней и пластин.

В других разновидностях таких теплообменников пазы для размещения проволочных змеевиков штампуются в самих пластинах. Иногда между пластинами устанавливаются стерженьки со специальными фиксаторами, после чего проводится пайка в печах. Стержни могут располагаться в коридорном и шахматном порядке.

Заключительный этап сборки ТА – закрепление крышек и коллекторов проводится аргоно-дуговой сваркой, шпильками или болтами.

## 5.2. Изготовление осевых вентиляторов технологических лазеров

Ряд преимуществ (относительная простота устройства, высокий КПД, высокая надежность) позволяет использовать осевые вентиляторы в конструкциях ЛТУ.

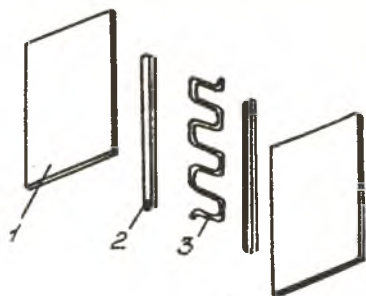
Лопатки являются основными деталями вентилятора и образуют боковые стенки профильных (межлопаточных) каналов для прохода газа. Каждый канал создается корытом пера (вогнутая часть) одной лопатки и спинкой пера (выпуклая часть) другой лопатки. Для крепления лопаток к ротору или с корпусом предусмотрены хвостовики. Исключение составляют беззамковые лопатки, соединяемые с корпусом сваркой или пайкой.

В качестве материалов для лопаток вентилятора применяют алюминиевые сплавы (АК4, АК6), стали (14Х12Н2, 30ХГСА), титановые сплавы. Заготовки получают горячей штамповкой, выдавливанием, прокаткой или вальцеванием из деформируемых сплавов и литьем по выплавляемым моделям из литейных сплавов.

Существует следующая последовательность обработки лопаток. Для рабочих лопаток вентилятора (заготовка – прецизионная штамповка): обработка баз; обработка хвостовика; обработка пера; отрезка технологического припуска на торце пера; обработка торца пера; нанесение покрытий; окончательный контроль. Для направляющих лопаток вентилятора (заготовка – непрецизионная штамповка): обработка баз; черновая обработка цапф; окончательная обработка пера; доводка; нанесение покрытий; окончательный контроль.

Диски, служащие для крепления рабочих лопаток, изготавливаются из сталей (30ХГСА и др.), титановых и алюминиевых сплавов и пластмасс. Заготовки дисков штампуют в закрытых штампах.

Механическая обработка дисков обеспечивает шероховатость поверхности 6 класса и начинается с подрезки торца. Цель операции – подготовить заготовку для ультразвукового контроля на сплошность материала. После контроля проводится обдирка заготовки.



Р и с. 5.9. Элементы пластинчато-стержневого ТА: 1 – ограничивающая пластина; 2 – направляющий паз; 3 – стержень

Последовательность обработки дисков: подрезка торца заготовки; ультразвуковой контроль; обдирка; термообработка; отрезка образцов для механических испытаний; механическая обработка диска; полирование торцов и внутренних поверхностей; травление, промывка, выявление поверхностных дефектов; нарезание пазов; протягивание и контроль пазов; слесарная обработка пазов; чистовая обработка посадочных поверхностей; нарезание и контроль качества торцевых шлицев; статическая балансировка; анодирование или воронение; окончательный контроль.

Валы — детали ротора, предназначенные для передачи крутящих моментов. На валы действуют большие растягивающие, изгибающие и скручивающие нагрузки, поэтому их изготавливают прочными, жесткими, чаще всего из легированных сталей (18Х2Н4ВА, 40ХНМА, 30ХГСА и др.). Заготовки получают штамповкой, поперечным прокатом, ротационным выдавливанием, затем подвергают нормализации и очистке поверхностей для удаления окисной пленки.

Последовательность операций при обработке вала: термообработка (нормализация); подрезка торцов; черновая обработка (сверление и растачивание центрального отверстия, механическая обработка наружных поверхностей, шлифование внутренних и наружных цементируемых поверхностей); защита нецементируемых поверхностей меднением; цементация; восстановление баз — правка и зачистка базовых фасок центрального отверстия; шлифование; чистовая обработка (растачивание центрального отверстия, механическая обработка нецементируемых поверхностей, нарезание шлицев, сверление отверстий); окончательная обработка (полирование центрального отверстия, нарезание резьб, шлифование и полирование наружных поверхностей); балансировка вала; окончательный контроль.

Корпус служит основанием узлов и агрегатов вентилятора. В зависимости от условий работы и предъявляемых требований корпусы выполняют из алюминиевых, магниевых, титановых сплавов или конструкционных сталей (сталь 20 и др.).

Для изготовления корпусных деталей используют отливки; обечайки, полученные гибкой и сваркой из листового материала; режущие кольца заготовки сложного профиля и круглый прокат.

Последовательность обработки корпуса: токарная обработка; обработка отверстий; фрезерование плоскостей; нарезание резьб; обработка пазов; контроль; пассивирование.

Технологический процесс сборки вентилятора состоит из следующих этапов: сборка рабочих колес вентилятора; сборка ротора; общая сборка вентилятора.

Сборка рабочего колеса вентилятора выполняется в следующей последовательности: подбор лопаток по посадочным размерам и по весу; установка лопаток в диск; механическая обработка рабочего колеса; балансировка рабочего колеса.

Для установки лопаток в пазы диска используют метод пригонки, проводя измерения ширины каждого паза изготовленного диска. Уравновешенность колеса обеспечивается подбором лопаток по весу. Далее проводится механическая обработка колеса, динамическая и статическая балансировка.

При сборке ротора рабочие колеса последовательно устанавливают на шпильки и закрепляют. Контроль затяжки осуществляют по удлинению шпилек, контролируется торцевое биение. Точность центровки обеспечивается с помощью специальных втулок, одеваемых на шпильки. После сборки ротор подвергается динамической балансировке.

При общей сборке осевого вентилятора необходимо обеспечить в заданных пределах:

а) радиальный зазор между лопатками и внутренней поверхностью статора; радиальные зазоры в уплотнениях ступени; передний и задний осевые зазоры;

б) взаимное расположение торцов внутреннего и наружного колец ротора; взаимное расположение торцов внутреннего и наружного колец ротора; взаимное расположение торцов внутреннего и наружного колец ротора; взаимное расположение торцов внутреннего и наружного колец ротора;

в) соосность вала электропривода и ротора осевого вентилятора.

После общей сборки осевого вентилятора проводятся контроль и испытания.

## 6. ПРОИЗВОДСТВО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Как одна из составных частей ЛТУ и ЛТК технологический модуль включает в свой состав:

а) систему транспортировки и формирования излучения;

б) технологический пост для перемещения обрабатываемого изделия и подачи вспомогательных газов;

в) датчики параметров излучения и параметров технологического процесса;

г) программное устройство (систему ЧПУ);

д) устройство для установки-снятия и манипулирования обрабатываемой деталью (промышленный робот и координатный стол).

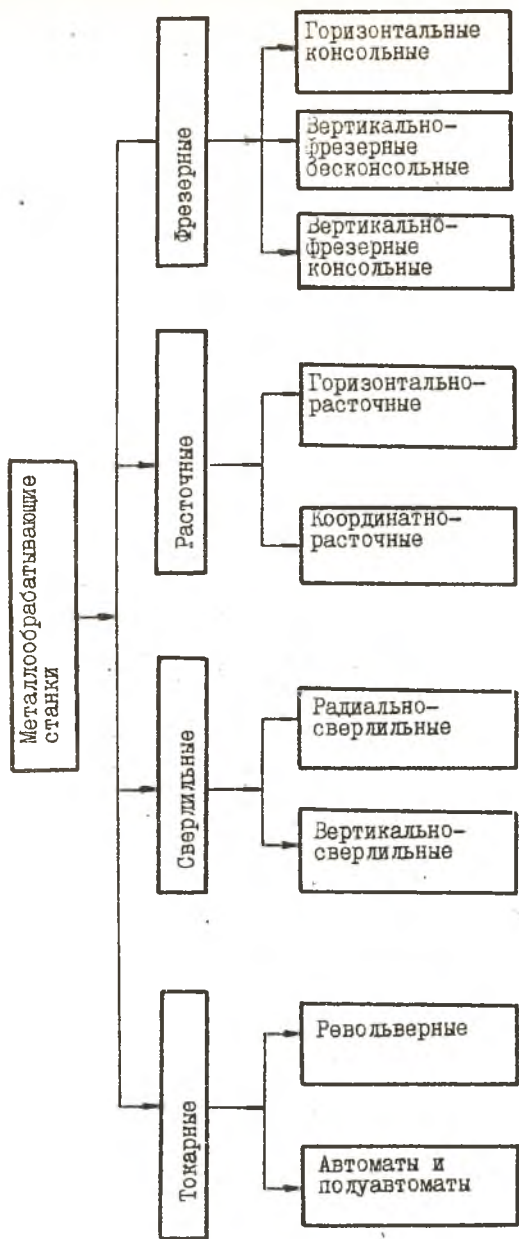
## 6.1. Изготовление координатных столов технологических модулей

Наиболее актуальны такие направления совершенствования средств обеспечения лазерной технологии, как разработка автоматизированных и роботизированных технологических комплексов, проектирование установок для совмещения различных видов обработки и гибких производственных систем, работающих по модульному принципу. Опыт внедрения технологических процессов на промышленных предприятиях показывает необходимость комплексного подхода к выбору и компоновке вспомогательного оборудования.

В развитых промышленных странах создан целый ряд ЛТК, спрос на которые, несмотря на относительно высокую стоимость, опережает предложение. В нашей стране в силу ряда обстоятельств создание подобных комплексов отстает от темпов их производства за рубежом. В то же время разработан и серийно выпускается целый ряд технологических лазеров, способных выполнять операции, связанные с обработкой различных материалов. Накоплен значительный опыт разработки и использования металлорежущих станков с ЧПУ, имеющих высокую надежность, прецизионную точность перемещений и возможность комплексного регулирования параметров работы станка. Металлообрабатывающие станки, применение которых целесообразно в технологических модулях ЛТК, представлены на рис. 6.1.

Базовые детали (станины, колонны, основания) координатных столов ЛТК выполняют введением дополнительных ребер жесткости. Повышенную жесткость имеют и подвижные несущие элементы (суппорты, столы, салазки). Столы, например, выполняют коробчатой формы с продольными и поперечными ребрами. Базовые детали изготавливают литыми или сварными. Перспективно выполнять такие детали из полимерного бетона или синтетического гранита для повышения жесткости и виброустойчивости. Направляющие станков с ЧПУ должны иметь высокую износостойкость и малую величину силы трения, что позволяет снизить мощность следящего привода, увеличить точность перемещений, уменьшить рассогласование в следящей системе.

Направляющие скольжения имеют повышенный износ и высокий коэффициент трения, особенно на малых скоростях. Уменьшить коэффициент трения позволяет изготовление направляющих скольжения станины и суппорта в виде пары скольжения "сталь (или чугун) - пластиковое покрытие (фторопласт и др.)". Стальные направляющие из ШХ9, ШХ15, ХВГ



Р и с. 6.1. Металлообрабатывающие станки, применение которых целесообразно в технологических модулях ЛТК

имеют твердость  $HRC_c$ , до 60...62 ед., а чугуны из СЧ15, СЧ30, СЧ40 – до 52...55 ед. В большинстве станков с ЧПУ используют направляющие качения, комбинированные качения и скольжения, а в тяжелых станках – гидростатические направляющие.

Направляющие качения имеют высокую долговечность, характеризуются небольшим трением, причем коэффициент трения практически не зависит от скорости движения. В качестве тел качения используют ролики. Для направляющих качения применяют те же исходные профили, что и для направляющих скольжения (прямоугольные, треугольные, трапециевидные и т.д.). Предварительный натяг повышает жесткость направляющих в 2–3 раза, для создания натяга используют регулирующие устройства. При проектировании координатных столов для лазерных технологических процессов с большими скоростями вспомогательных перемещения заготовки целесообразно применять замкнутые направляющие качения. В этом случае опрокидыванию и разъединению деталей стола препятствуют планки и другие устройства.

Привод подач и позиционирования (т.е. перемещения рабочего органа станка в требуемую позицию согласно программе) должен выполняться с минимально возможными зазорами и со стабильными параметрами, иметь высокую жесткость и плавность перемещения при малых скоростях, большую скорость вспомогательных перемещений рабочих органов (до 4 м/мин и более). Привод подач характеризуется также малым временем разгона и торможения, небольшими силами трения, уменьшенным нагревом элементов привода, большим диапазоном регулирования. Эти требования можно осуществлять, применив шариковые и гидростатические винтовые передачи, направляющие качения и гидростатические направляющие, беззазорные редукторы с короткими кинематическими цепями и т.д. Точность позиционирования во многом зависит от точности срабатывания электродвигателей, электромагнитных муфт, тормозных устройств.

Для винтов и гаек ходовых винтов установлено пять классов точности (от нулевого по четвертого). Нормаль предусматривает отклонения шага, половины угла профиля резьбы, отклонения по овальности на среднем диаметре и биение по наружному диаметру. Материалы для ходовых винтов согласно той же нормали устанавливаются: сталь У10 и У12 – для винтов нулевого класса, сталь ХВГ и ХГ – для первого класса, сталь 45 и 50 – для винтов второго, третьего и четвертого классов. Гайки скольжения изготавливают: нулевого, первого и второго классов – из оловянистой бронзы, третьего и четвертого классов – из антифрикционного чугуна. Распределение по классам такое: нулевой класс – резьбы для прецизионных станков, первый класс – для резьбошлифоваль-

ных станков, второй класс – для токарно-винторезных станков нормальной точности, третий класс – для фрезерных и строгальных станков и четвертый класс – для установочных перемещений.

## 6.2. Изготовление оптических устройств для транспортировки лазерного излучения

В качестве оптических материалов используются вещества прозрачные в диапазоне длины волны лазерного излучения для элементов проходной оптики и металлические среды для элементов отражательной оптики. Способы обработки, аналогичные традиционным способам, принятым в производстве точных оптических деталей, осуществляются в следующей последовательности: заготовительные операции, предварительное грубое шлифование, тонкое шлифование, полирование, центрирование. Конкретизация оборудования, обрабатываемого и контрольного инструмента, режимов обработки и обрабатываемых материалов проводится для каждой оптической детали на основании технологических процессов, включающих всю последовательность операций.

Наряду с общепринятыми требованиями к оптическим средам: высокий коэффициент отражения или пропускания на рабочей длине волны, малое поглощение к оптическим средам лазерных элементов предъявляются и специфические требования. Это требования к стойкости оптических элементов, стабильности свойств и комплексу теплофизических свойств. Широкое внедрение технологических лазеров предполагает использование материалов, стойких к оптическому нагружению в пределах  $10^2 \dots 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> при непрерывном режиме и  $10^4 \dots 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> при импульсно-периодическом режиме с ресурсом работы более 500 часов. Для элементов отражательной оптики местные отклонения на диаметре до 80 мм должны быть менее 0,3 мкм, максимальная шероховатость менее 0,05 мкм при диаметре рабочей поверхности до 200 мм. Показатель объемного поглощения для элементов проходной оптики не должен превышать  $(1 \dots 5) \cdot 10^{-5}$  см<sup>-1</sup>, оптическая плотность при импульсно-периодическом режиме – до  $5 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> при размере заготовок до 200 мм.

В соответствии с назначением материалы для оптических элементов разделяют на следующие группы:

а) материалы для активных элементов твердотельных лазеров: неодимовые стекла, рубин, алмаониттриевый гранат с неодимом, лейкосапфир;

б) материалы для элементов проходной оптики;

- в) поляризационные материалы: исландский шпат, слюда-мусковит, кристаллический кварц, сульфид кадмия;
- г) материалы для элементов отражательной оптики;
- д) электрооптические материалы: дигидрофосфаты аммония и калия;
- е) интерференционные материалы: используется более сорока типов покрытий.

В качестве оптических элементов проходной оптики используют стекло; тугоплавкие материалы  $Si$ ,  $Ge$ ,  $Al_2O_3$ ; полупроводниковые соединения  $ZnSe$ ,  $CdTe$ ,  $GaAs$ ; монокристаллические растворы на основе солей таллия КРС-5 и КРС-6; щелочно-галлоидные кристаллы  $KCl$ ,  $NaCl$ ,  $CaF_2$ ,  $LiF$ ,  $BaF_2$ ; оптическая керамика КОЗ на основе  $CaF_2$ , КО4 на основе  $ZnSe$  и КО6 на основе  $CdTe$ .

Для элементов отражательной оптики наиболее часто применяются медь марок М00Б и М0Б, бронза БрХ08, молибден, вольфрам. Для надежного предохранения этих материалов от окисления при длительном хранении и сильном нагреве установлена номенклатура предпочтительных покрытий — фториды и другие интерференционные покрытия с малым поглощением на рабочей длине волны. Отработана технология изготовления различных конструкций элементов отражательной оптики, обеспечивающих охлаждение зеркала в процессе эксплуатации.

Для обработки прозрачных материалов применяется следующее оборудование. Распиловку заготовок и кускового стекла проводят на отрезных станках типа АОС-200. Сфершлифовальные автоматы моделей АПС-70 и АП-70К предназначены для предварительного шлифования кольцевым алмазным инструментом сферических и плоских поверхностей заготовок оптических деталей. Тонкое шлифование плоских поверхностей заготовок или блоков заготовок оптических деталей проводят алмазным инструментом на шлифовальном станке типа СТША-400 ПМ. Станки полировально-доводочные ПД-500, 6ПД-100М, 4ПД-200, 3ПД-320 предназначены для точного шлифования, полирования и доводки сферических и плоских поверхностей оптических деталей в блоках методом свободного притира с применением свободного абразива. Центрировочные полуавтоматы ЦС-350, ЦСП-350, ЦСМ-50, ЦСМ-100 предназначены для центрирования и обработки торцов оптических деталей алмазным шлифовальным кругом. Крепление деталей осуществляется в самоцентрирующем патроне или наклеиванием на оправку.

Номенклатура станков для прецизионной обработки металлооптики сравнительно невелика. Это отечественные станки "Сфера", МС-600 ПД, МК 6514, МК 6516 и зарубежные FM 125, 300/500B (Германия).

Формообразование поверхностей оптических деталей осуществляется двумя последовательными операциями: предварительное (грубое) шлифо —

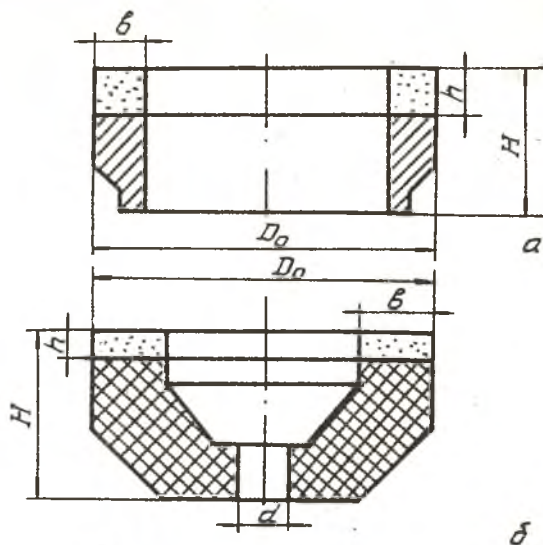
вание, при котором с заготовок снимается окисная часть припуска на механическую обработку, и тонкое шлифование, при котором заготовкам придают окончательные размеры с припуском, учитывающим дальнейшее полирование поверхности.

Предварительное шлифование выполняют способом принудительного формообразования алмазным инструментом или способом поверхностного притира свободным абразивом. В качестве инструмента

для шлифования как плоских, так и сферических поверхностей используют шлифовальные круги (рис. 6.2) из алмазных порошков, специально предназначенные для обработки труднообрабатываемых материалов.

Используемые в шлифовальных кругах порошки изготавливаются из синтетических поликристаллических алмазов АСВ, АСК и АСС дроблением алмазосодержащих спеков, полученных прямым синтезом из графита.

Тонкое шлифование выполняют способом поверхностного притира свободным алмазным инструментом в виде планшайб, грибов и чашек, изготовленных из алюминиевых сплавов, с абразивной обкладкой алмазосодержащими элементами. Элементы прикрепляются к корпусу полировочной смолой СП-1 рядами по концентрическим окружностям или по логарифмической спирали. Операция полирования (после которой высота неровностей обрабатываемой поверхности становится меньше рабочей длины волны излучения, нарушенный шлифованием слой материала полностью удаляется, а поверхности придается заданная точность формы и чистота) выполняется способом притира, а при обработке металлооптики – алмазным точением. Используемый для полирования способом притира инструмент представляет собой корпус из цинкового или алюминиевого сплава, на рабочей по-



Р и с. 6.2. Круги алмазные шлифовальные: кольцевой с выточкой – форма 2А2 (а) и чашечный конический – форма 12А2 (б)

верхности которого крепится материал марки ПМО, выполняющий функции носителя полирующего абразива, подаваемого в зону полирования. Полирование способом алмазного точения осуществляют резцами из натуральных алмазов, которые крепятся к державке пайкой припоем ПСР-45 или запрессовкой методом порошковой металлургии.

Природные или синтетические твердые, мелкозернистые, кристаллические порошкообразные шлифующие абразивы применяют в свободном состоянии в водных суспензиях и пастах или в связанном состоянии, например, алмазный инструмент, шлифовальные круги. В зависимости от размера зерен различают следующие группы шлифовальных материалов: шлифзерно (2000...160 мкм); шлифпорошки (125...40 мкм); микропорошки (63...14 мкм) и тонкие микропорошки (10...3 мкм). Порошки природных и синтетических алмазов разделены на две группы: шлифпорошки и микропорошки. Полирующие абразивы используются в виде паст или водных суспензий.

В оптическом производстве применяются различные вспомогательные материалы: смазочно-охлаждающие жидкости, наклеечные смолы, защитные лаки, фасочные эмали, промывочные жидкости и материалы для чистки и притирки оптических деталей лазерных установок.

Обработку стекла абразивами, находящимися в связанном или свободном состоянии, ведут, используя смазочно-охлаждающие жидкости, которые обеспечивают отвод тепла и продуктов изнашивания из зоны обработки, способствуют разрушению поверхности путем физико-химического воздействия, уменьшают трение.

Для соединения заготовок оптических деталей с технологическим приспособлением применяют вещества, которые должны: иметь высокую адгезию к материалу заготовки и приспособлению, обеспечивающую их прочное соединение и неизменность взаимного положения при механической обработке заготовок; не вызывать упругой деформации заготовок; не вносить погрешности базирования и закрепления при установке заготовки; не вступать в химическое взаимодействие с материалом заготовки; легко отставать от поверхности заготовок и приспособления (не требовать для их очистки применения токсичных и огнеопасных растворителей).

Наиболее распространены сплавы термопластичных веществ (наклеечные смолы, воски, парафины, сплавы металлов с низкой температурой плавления, шеллак), сублимационные клеи и гипс, водные растворы которых переходят в твердое состояние.

Для межоперационной защиты полированных поверхностей от повреждений в процессе механической обработки, а также для защиты химически нестойких и налетоопасных стекол и водорастворимых кристаллов применяют защитные лаки.

Остатки шлифующих, полирующих абразивов и наклеечных смол после окончания этапов механической обработки удаляются следующими мощными составами: чистой водой температурой 293 К для удаления твердых частиц абразивов; водными растворами  $\text{NaOH}$  и  $\text{KOH}$  для растворения наклеечных смол, защитных лаков, воска, парафина после операции точного шлифования; органическими растворителями и их смесями (ацетон-бензин, ацетон-спирт, спирт-бензин) для растворения наклеечных смол и защитных лаков, нанесенных на предварительно полированные поверхности; 1-процентным раствором двухлористого олова и концентрированной соляной кислоте для удаления следов полирующего абразива с нерабочих поверхностей деталей.

Перед нанесением покрытий полированные поверхности подвергают чистке органическими растворителями; петролейным и этиловым эфиром, спиртом-ректификатом этиловым, смесью петролейного эфира со спиртом.

Протирку оптических деталей выполняют салфетками из мягких тканей: фланели, батиста, льняного полотна. Окончательную чистку полированных поверхностей выполняют медицинской гигроскопической ватой, подвергнутой дополнительной обработке - обезжириванию.

В технологических операциях с применением  $\text{CO}_2$ -лазеров в качестве основных элементов систем транспортировки и формирования излучения целесообразно применять выполненные из меди элементы плоской оптики - фокусаторы излучения. Фокусаторы предоставляют возможность сформировать требуемый профиль интенсивности излучения на поверхности обрабатываемой детали.

Изготовление фокусаторов инфракрасного диапазона представляет собой сложный технологический процесс, базирующийся на автоматизированной технологии. Основные этапы: вывод аналитических зависимостей формы поверхности оптического элемента; вычисление отсчетов фокусатора на ЭВМ; изготовление шаблона на проекционном фотопостроителе, управляемом от ЭВМ; преобразование распределения оптической плотности в распределение высоты фазового рельефа; изготовление жесткой матрицы из неметаллического материала; вакуумное напыление и электролитическое осаждение меди.

Программы расчета фокусаторов создаются в рамках пакета прикладных программ, созданного на кафедре технической кибернетики Самарского государственного аэрокосмического университета. Из-за большого объема вычисления отсчетов фокусатора проводятся на ЭВМ с производительностью не менее 1000...2000 операций в секунду и оперативной памятью не менее 1...4 Мбайт. При расчете фокусатора в отрезок размером 51,2x72,4 мм с разрешением 2048x3410 отсчетов при квантовании каждо-

го отсчета по 256 уровням, кодировании и записи на носителе в форме 8 бит на отсчет объем информации на носителе достигает 7 Мбайт.

Первый блок (заголовок) содержит текстовую информацию, в том числе массив из 960 элементов типа CHARACTER(I) для PL/I или LOGICAL 1 для фортрана. В заголовке содержатся данные о размерах и организации матрицы отсчетов фокусатора, местонахождении матрицы на носителе. Кроме того, программы поблочного расчета матрицы фокусатора заносят в комментарий параметры фокусатора. Кодирование, квантование и запись на носителе блоков отсчетов матрицы осуществляются программами-мониторами архива.

Для вывода информации на фотопостроитель программа-монитор архива из версии пакета прикладных программ на основании данных заголовка производит обработку поля отсчетов фокусатора и обеспечивает работу программ, выводящих информацию через устройство сопряжения на фотопостроитель.

Изображение строится прецизированием диафрагмы квадратного сечения, освещенной фотодиодом, в плоскость фотоносителя. При этом динамический диапазон яркости светодиода, осуществляющего засветку, составляет 256 градаций яркости. Настройка на резкость осуществляется путем получения нескольких экспозиций шахматного поля. Размер прецизируемой диафрагмы должен совпадать с шагом перемещения светового пятна в плоскости фотошленки. При несовпадении образуются скачки оптической плотности либо до уровня вуали, либо выше максимального заданного почернения.

Фоторезистивная матрица изготавливается следующим образом. На тщательно вымытые и прогретые до 100°C стеклянные пластины накатывают пленочный фоторезист СПВШ. После выдержки пластин при комнатной температуре в течение часа проводят засветку пластин контактным способом через фотошаблон фокусатора лампами ультрафиолетового излучения ДРТ-1000. Под действием ультрафиолетового излучения происходит полимеризация фоторезиста. Толщина полимеризовавшегося слоя растет прямо пропорционально оптической плотности. Коэффициент контрастности, определяющий высоту рельефа, подбирают экспериментально изменением экспозиции. Найденное время экспозиции является постоянной величиной для фокусаторов с заданной длиной волны при неизменном технологическом цикле. Фоторезист — очень контрастный фотоматериал, поэтому в процессе засветки фотошаблона необходимо обеспечить высокую степень равномерности поля засветки.

Пластинка с фоторезистом проявляется в слабощелочном растворе. Для замедления проявления и получения более гладкого поверхностного

рельефа без дополнительного "шума" в состав проявителя добавляется глицерин.

После промывки и сушки на поверхность микрорельефа напыляют слой меди толщиной около 0,1 мкм и проводят испытания полученной матрицы на стенде с  $\text{CO}_2$ -лазером небольшой мощности (10...20 Вт). Если технологический цикл прошел удачно и энергетическая эффективность фокусатора достаточна, то контактным способом изготавливают жесткую матрицу на смоле ТМ-3. На нее напыляют слой меди и электролитическим осаждением проводят наращивание меди до толщины 4...5 мм.

С одной жесткой матрицы получают 2...5 медных фокусаторов в зависимости от степени адгезии смолы к стеклянной подложке, на которой выполнена матрица. С фоторезистивной матрицы изготавливают несколько копий матриц на смоле. При каждом снятии копии тонкий слой меди, напыленный на фоторезист, отслаивается и его надо восстанавливать. После каждого напыления в вакууме слой фоторезиста дает усадку, что снижает качество. Самый простой способ тиражирования - с готового медного фокусатора, в этом случае ограничений по количеству копий нет.

Автоматизированный комплекс используется для изготовления не только отражающих, но и пропускающих излучение фокусаторов. При изготовлении фокусаторов видимого диапазона фотошаблоны на фотопостроителе выводятся в увеличенном масштабе, так как ширина зон фокусаторов видимого диапазона на порядок меньше шага дискретизации. С помощью прецизионного фотоповторителя проводится уменьшение выведенного шаблона до необходимого размера и литографическими методами получают либо бинарный, либо многоградационный рельеф протравливанием стекла в плавиковой кислоте.

## 7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ УЗЛОВ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

### 7.1. Обеспечение вакуумной плотности соединений

Для получения в объеме заданного давления и поддержания его длительный период времени к материалам, используемым для изготовления трактов технологических лазеров, предъявляется ряд требований, таких как минимальная пористость; минимальное газовыделение; высокая коррозионная стойкость; инертность по отношению к маслам и промывочным средствам, в качестве которых чаще всего используются различного ро-

да органические растворители; хорошая обрабатываемость и возможность получения чистой и гладкой поверхности; отсутствие химической реакции с образованием газообразных продуктов; малая адсорбция.

В лазерной технике для изготовления корпусных деталей широко применяются коррозионно-стойкие стали, чаще всего марки X18H9T и X18H10T. Они хорошо свариваются, химически устойчивы, достаточно жаропрочны, пластичны, хорошо прокатываются, выдерживают глубокую вытяжку. Сварные соединения из этих сталей являются вакуумно-плотными.

Для производства корпусных деталей химических лазеров используется никель. Образующийся на внутренних поверхностях таких установок фторид никеля является достаточно стойким материалом. Никель даже в холодном состоянии воспринимает различные виды механической обработки: ковку, прокатку, волочение, штамповку, образует паяное соединение не только со сталью и медью, но и с алюминием.

Для осуществления высоковакуумных спаев с тугоплавкими стеклами применяют сплав ковар (H28K18). При необходимости устранения влияния нагрева применяют сплав инвар, обладающий малым коэффициентом теплового расширения и степенью его зависимости от температуры.

В лазерной технике используются литейные алюминиевые сплавы АЛ2, АЛ4, АЛ9, имеющие достаточно высокую коррозионную стойкость и невысокую пористость при небольшом удельном весе.

Применяется медь марки М1 или МБ, которая кроме хорошей обрабатываемости и газонепроницаемости имеет высокую тепло- и электропроводность. Возможно получение вакуумно-плотных спаев меди со стеклом. Латунь используется крайне редко из-за высокой летучести и интенсивного испарения цинка при нагреве, что приводит к загрязнению установки и делает структуру сплава пористой. Для сильфонов, пружинящих контактов редко используется бериллиевая бронза.

Стекло и керамика широко используются в качестве конструктивных материалов, например, отпаянные лазеры, как правило, изготавливаются из стекла. Из стекла и керамики изготавливаются смотровые окна и изоляторы. Следует отметить, что стекло является активным сорбентом газов и поэтому обладает значительным газовыделением (в основном пары воды, а также  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ ).

Керамика по многим из своих свойств существенно превосходит стекло. Она имеет значительно большую стабильность свойств в более широком температурном диапазоне. Высокая прочность керамики позволяет осуществлять прочное вакуумное соединение керамических деталей с различными металлами и сплавами. Газовыделение керамики значительно меньше, чем у стекол. Совокупность этих свойств позволяет использо-

вать керамику для изготовления ответственных элементов лазерной техники. Применяется форстеритовая керамика (ЛФII, ФI7, КВФ4), алмосиликатная керамика, алмооксидная керамика (22X, 22XC, А994) и бериллиевая керамика (брокелит 9).

Используются ситаллы, получаемые частичной или полной кристаллизацией стекол. Такие их свойства, как малый коэффициент линейного расширения, возможность качественной обработки поверхности обусловлены мелкозернистой структурой ситаллов. В лазерной технике применяются марки ситаллов СТ32-1, СТ38-1, СТ50-1.

Резина является наиболее распространенным материалом вакуумных уплотнений. Прокладочный материал для обеспечения герметичности разборных соединений должен полностью устранить течи при незначительном газовыделении из самой уплотняющей прокладки. Наиболее часто применяются специальные вакуумные резины 7889, 9024, ИРП-2043. Белая вакуумная резина 7889 обладает высокими эластичными свойствами, хорошо уплотняет разборные соединения, но имеет пониженную стойкость против масел и органических соединений и значительное газовыделение. Поэтому чаще используют черную вакуумную резину 9024, менее эластичную, но более маслостойкую и обладающую вдвое меньшим газовыделением. Лучшим уплотнением в лазерной технике считается витон, отличающийся высокой термостойкостью и малым газовыделением. Выделяемые из витона газы не отравляют рабочую смесь  $\text{CO}_2$ -лазера. Недостаток: при температурах ниже  $-70^\circ\text{C}$  витон становится хрупким материалом, а при температурах выше  $+180^\circ\text{C}$  начинается процесс разложения.

В качестве прокладок, допускающих высокотемпературный перегрев, используется полимерный материал фторопласт - 4.

Любая вакуумная система состоит из большого числа различных элементов. Герметичное соединение их между собой является одной из основных задач, решаемых при проектировании и эксплуатации. Неплотности могут образовываться в процессе изготовления из-за некачественной сварки или пайки, при монтаже вследствие неправильной сборки уплотнений и при эксплуатации из-за деформации фланцев, повреждений уплотняющих прокладок и т.д. Различают разъёмные и неразъёмные соединения. Неразъёмные соединения получают сваркой, пайкой и склеиванием. Разъёмными соединениями называют такие соединения, в которых герметичность достигается сжатием с определенным усилием уплотняющих прокладок, расположенных между сочленяемыми элементами вакуумных систем.

Для изготовления неразъёмных соединений чаще всего используют сварку. Она обеспечивает более надежные вакуумно-герметичные соединения.

Применение того или иного вида сварки определяется материалом, конструкцией стыкуемых деталей и толщиной их стенок. В лазерной технике при изготовлении корпусных деталей применяются электродуговая и аргоно-дуговая сварки. При этом механическая обработка сварных вакуумных швов не рекомендуется, так как она может привести к появлению течей; подварка дефектного участка вакуумного шва производится путем его вырубки или срезки с последующим наложением нового шва; целесообразно избегать двусторонних швов, которые затрудняют проверку на вакуумную герметичность; при сварке металла различной толщины приводят его в месте сварки к одинаковой толщине.

Пайку выполняют в тех случаях, когда для получения соединений металла с металлом или металла с керамикой невозможно применить сварку. Стыковые (торцевые) швы малонадежны в отношении герметичности, поэтому при напряженных швах, работающих на срез, применяют телескопические соединения (соединения внахлест).

Наиболее рациональным вариантом конструкции телескопического паяного узла при сочленении труб из разнородных материалов считается такой, в котором деталь с меньшим коэффициентом линейного расширения является внутренней. При охлаждении после пайки внутренняя деталь сокращается меньше и слой припоя оказывается нагруженным на сжатие.

Пайка проводится на воздухе, в среде водорода и в вакууме. Припоя в зависимости от материалов могут быть самыми разными. Для пайки на воздухе обычно применяют медные, серебряные, медно-серебряные, медно-серебряно-индиевые и другие припои. Припоями для пайки в водороде и вакууме большей частью служат чистые металлы — медь, серебро или их эвтектический сплав ПСр-72. Пайка в водороде и в вакууме наиболее рациональна для конструкционной стали, никеля, молибдена; пайка нержавеющей сталей этими методами не целесообразна. В вакууме также паяется медь всех сортов, в водороде — только бескислородная медь.

Для обеспечения качества паяных изделий существенное значение имеют правильный выбор зазоров и назначение предельных отклонений размеров сопрягаемых деталей. При пайке мягкими припоями оптимальные зазоры между соединяемыми деталями составляют 0,05...0,15 мм. При пайке твердыми припоями — 0,025...0,065 мм. Обработка сопрягаемых деталей в месте пайки назначается по 5-6 классу шероховатости.

В лазерной технике используются также соединения с применением ситалло-цемента СЦ90-1. Такие соединения хорошо работают на срез и плохо на разрыв, поэтому конструктивно их проектируют аналогично паяным.

Разъемные соединения относятся к числу наиболее ответственных узлов любой вакуумной системы. Это связано с тем, что потеря вакуумной плотности системы чаще всего вызывается разгерметизацией разъемного соединения. При выборе конструкции соединения руководствуются следующими характеристиками:

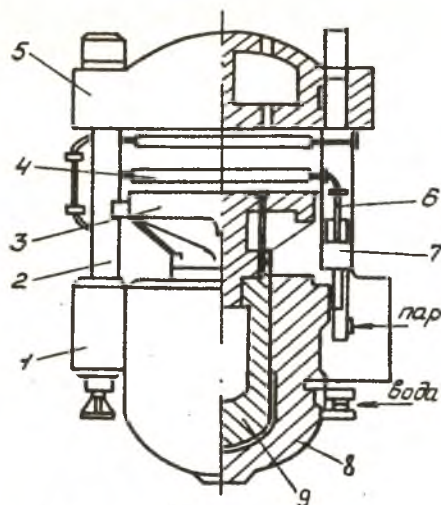
- а) натеканием, т.е. количеством газа, протекающего в единицу времени в вакуумный объем между поверхностями уплотнителя и элементом соединения, а также за счет проницаемости газа через материал уплотнителя;
- б) газовыделением с поверхностей уплотнителя и элементов соединения, соприкасающихся с вакуумным объемом;
- в) механической прочностью соединения;
- г) термической стойкостью, т.е. способностью выдерживать многократные нагревы и охлаждения без нарушения герметичности;
- д) химической стойкостью;
- е) легкостью монтажа и демонтажа соединения и степенью сложности его изготовления;
- ж) простотой проверки герметичности.

В разъемных соединениях в зависимости от предъявляемых требований к разряжению в вакуумной системе чаще всего используются неметаллические уплотнители (резины).

Шнуры различной конфигурации, используемые для герметизации излучателей газоразрядных ТЛ, изготавливаются на предприятиях резино-технической отрасли из резиновых смесей.

При выпуске уплотнителей для ТЛ в мелкосерийном производстве с часто меняющимся ассортиментом замкнутый контур возможно получать склеиванием концов резинового шнура клеями типа 88-СА. Эта операция не требует сложного аппаратного оформления и может производиться вручную. Вулканизация обеспечивает более прочное и гибкое монолитное однородное соединение. В данном случае используется гидравлический колонный вулканизационный пресс, сочетающий простоту конструкции, удобство эксплуатации и возможность получения качественного соединения. На рис. 7.1 представлена схема вулканизационного пресса.

Гидравлический цилиндр 8 пресса отлит из стали или специального чугуна вместе со станиной. На четырех колоннах 2 установлена верхняя траверса 5. Внутри гидравлического цилиндра помещен плунжер 9, на котором смонтирован подвижный стол 3 с укрепленной на нем нагревательной плитой 4. Такая же плита находится между столом и верхней траверсой. Обогрев плит производится паром, подаваемым через телескопи-



Р и с. 7.1. Колонный вулканизационный пресс: 1 - станина; 2 - колонна; 3 - подвижный стол; 4 - нагревательная плита; 5 - верхняя траверса; 6 - трубы; 7 - коллектор; 8 - цилиндр; 9 - плунжер

создается гидравлическим давлением до 12,5 МПа. Нагревательная плита представляет собой стальную пластину с просверленными продольными каналами, образующими разветвленную сеть, для прохода греющего пара и выпуска конденсата имеются специальные отверстия.

Для получения удобной для склеивания или вулканизации конфигурации соединяемых концов резинового шнура мерный рез осуществляется под углом  $45^{\circ}$  к оси шнура.

## 7.2. Контроль герметичности

Контроль герметичности проводится на предприятиях-изготовителях лазерной техники на заключительном этапе сборочно-монтажных работ. Герметичность - это непроницаемость стенок, ограничивающих газовый тракт, для газов и жидкостей.

Под неплотностью понимается наличие сквозных каналов в стенках конструкции или в местах соединений ее элементов, появляющихся, как правило, вследствие дефектов изготовления или сборки и нарушающих герметичность. Натекание - это суммарный поток через все неплотнос-

ческие трубы из коллектора 7. Каждая плита может перемещаться в вертикальном направлении.

Для проведения вулканизации пресс-формы с соединяемыми участками помещаются между плитами; в гидравлический цилиндр подается рабочая жидкость (вода, масло, эмульсия масла в воде); плунжер с рабочим столом начинает двигаться вверх. Происходит плотное замыкание между плитами и формирование соединяемого участка. Нагревание пресс-форм и соединяемых участков осуществляется за счет тепла, поступающего от горячих плит. Холостой ход плунжера вверх до начала прессования производится гидравлическим давлением до 2,5 МПа, а необходимое усилие прессования

ти вакуумной системы или ее элемента. Без учета газовыделения в объем натекание определяется по аналитической зависимости

$$Q = V \frac{\Delta P}{\tau},$$

где  $V$  – объем полости;  $\Delta P$  – изменение давления в этом объеме за время  $\tau$ .

Требования к степени герметичности системы определяются величиной максимально допустимого натекания. При контроле герметичности изделия выделяют две основные технологические операции:

1. Контроль герметичности – технологическая операция, проводимая для установления степени герметичности изделия.

2. Поиск течи – операция, заключающаяся в обнаружении и установлении мест расположения единичных течей.

Для установления степени герметичности системы с одной стороны оболочки подают пробное вещество – газ или жидкость, легко идентифицируемые в окружающей среде или в составе остаточного газа. С другой стороны оболочки фиксируют появление и количественное изменение содержания пробного вещества. По способу создания потока и идентификации пробного вещества различают следующие методы контроля герметичности: метод опрессовки, люминесцентный метод, метод искрового разряда, манометрический метод, галогенный метод, масс-спектрометрический метод и некоторые другие. В вакуумной технике наибольшее распространение получили масс-спектрометрический и манометрический методы в различных модификациях.

Применимость каждого метода определяется конструкцией установки, которая должна обеспечивать:

а) при испытании газовыми методами;

возможность свободного прохождения газа к контролируемым участкам и от них к измерительным приборам;

возможность присоединения изделия к испытательному стенду с минимальными потерями перепада давлений;

б) при испытании жидкостными методами:

отсутствие воздушных подушек в изделиях при заполнении их пробными жидкостями;

возможность отмывки изделий от пробных жидкостей до требуемых техническими условиями нормы по солевому содержанию и сухому остатку;

в) при испытании газожидкостными методами – возможность удаления индикаторной среды с контролируемой поверхности.

Компрессионный метод заключается в создании внутри испытуемого

объекта избыточного давления индикаторной жидкости или газа и регистрации протечек через неплотности. Метод неприменим к полностью собранной вакуумной системе, потому что чаще всего не все ее узлы могут выдержать избыточное давление, однако очень удобен и целесообразен для предварительных испытаний на герметичность отдельных элементов вакуумной системы. При использовании жидкости в качестве индикаторной среды (керосин, масло, 2-5-процентный раствор хромпика -  $K_2Cr_2O_7$  - в воде и т.д.) после определенной выдержки (10...15 мин) объекта под избыточным давлением производят внешний осмотр или накладывают на его поверхность фильтрованную бумагу. Необходимо помнить, что чувствительность этого метода в данном случае в значительной степени зависит от чистоты индикаторной жидкости, т.е. от наличия в ней растворимых или нерастворимых примесей, соответственно увеличивающих ее вязкость или забивающих каналы неплотностей.

При заполнении испытуемого объекта воздухом или азотом под избыточным давлением на его наружную поверхность наносят мыльную эмульсию. При наличии течей индикаторный газ, проникая через них, образует мыльные пузырьки, позволяющие качественно оценить герметичность. Время наблюдения не должно превышать 5 мин, поскольку мыльная пленка, высыхая, теряет свои эластичные свойства. Течь может быть обнаружена и пузырьковым методом с погружением испытуемого объекта в воду. Индикацию утечек производят по частоте появления и диаметру пузырьков газа, возникающих в местах течей, при этом достаточная глубина погружения - не более 3...5 мм. Чувствительность этого способа контроля герметичности при прочих равных условиях зависит от времени выдержки, а также от применяемого индикаторного газа. Так, например, при использовании вместо воздуха водорода она может быть повышена в два раза. Количественную оценку герметичности объекта при использовании компрессионного метода производят: при заполнении объекта жидкостью - по количеству вытекшей жидкости за время наблюдения с последующим пересчетом на эквивалентную величину газового потока; при заполнении объекта газом - по падению давления в объеме за определенный промежуток времени; при погружении в воду - по выражению

$$Q \approx P_a \frac{\pi d_0}{6\tau},$$

где  $d_0$  - диаметр пузырька в момент отрыва;  $P_a$  - атмосферное давление;  $\tau$  - время до отрыва.

Люминесцентный метод течеискания основан на регистрации флуоресцирующей жидкости, проникающей через неплотности испытуемого объекта,

при облучении его поверхности ультрафиолетовыми лучами. Используется в тех случаях, когда испытанию на герметичность подлежат малогабаритные открытые объекты, откачка или опрессовка которых затруднена или невозможна.

Испытуемый объект целиком или его участок помещают в раствор люминофора в органической жидкости (трихлорэтилен, четыреххлористый углерод, керосин и т.д.) так, чтобы он не попал во внутреннюю полость, которую после выдержки в течение некоторого времени обследуют в ультрафиолетовых лучах. Если в испытуемом объекте имеется неплотность, то под действием капиллярных сил раствор втягивается внутрь капиллярного канала неплотности и проходит на противоположную сторону, где по мере испарения растворителя накапливается подсохший люминофор. При облучении объекта ультрафиолетовыми лучами в местах расположения неплотностей наблюдается свечение. О степени герметичности можно судить по времени появления свечения или его интенсивности.

Чувствительность люминесцентного метода в значительной мере зависит от вида индикаторного вещества, а также от времени выдержки в растворе.

Газоэлектрический (искровой) метод используется для отыскания течей в вакуумных системах, имеющих стеклянное исполнение. Он основан на световых явлениях, которые появляются при наложении высокочастотного напряжения (с помощью трансформатора Тесла). Сущность метода заключается в следующем: в откаченном объеме, отделенном от окружающего пространства стеклянными стенками, может быть возбужден безэлектродный высокочастотный разряд, вид и цвет которого зависит от давления и рода газа, формы испытуемого объекта, направления и величины приложенного напряжения. Так, в диапазоне давлений от нескольких мм рт. ст. до  $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. возникает разряд, сопровождающийся интенсивным свечением, которое исчезает по мере улучшения вакуума.

Место течи на гладкой стеклянной поверхности установки можно обнаружить передвижением вдоль нее острия электрода. Приближение электрода на расстояние порядка 1 см к неплотности сопровождается формированием разряда в тонкий ярко-белый искровой пучок, направленный своим концом на место нахождения течи.

Манометрический метод обнаружения течи основан на изменении показаний манометров вследствие реакции на проникновение через неплотности индикаторных веществ. Необходимо отметить, что манометры широко используют для определения общей герметичности по изменению давления в изолированных объемах.

В качестве индикаторных веществ могут применяться как жидкости, так и газы. При использовании жидких индикаторных веществ изменение показаний манометра происходит из-за резкого увеличения количества протекающего через неплотность вещества при замене воздуха индикаторной жидкостью. Эффект изменения показаний манометра при использовании газа характерен для манометров косвенного действия и связан с изменением его чувствительности к различным газам.

Методы контроля герметичности с применением течеискателей наиболее универсальны и чувствительны. В качестве пробного газа для масс-спектрометрических течеискателей используются хладон-12 ( $CF_2Cl_2$ ), хладон-13 ( $CF_3Cl$ ), гелий, аргон, водород. При выборе газа учитывают его наличие в атмосфере и в помещении, где проводится контроль. Так, для масс-спектрометрического течеискателя переход с гелия на водород снижает чувствительность на четыре порядка из-за фоновых показаний. Одним из способов увеличения чувствительности является повышение давления пробного газа, если это позволяет конструкция. Основным параметром, определяющим пригодность течеискателя, — его газоаналитическая чувствительность, которая характеризует наименьшую регистрируемую концентрацию газа в анализируемой смеси

$$D_{\min} = \frac{P_{\min}}{P_x},$$

где  $D_{\min}$  — газоаналитическая чувствительность;  $P_{\min}$  — минимальное регистрируемое парциальное давление смеси или пробного газа;  $P_x$  — полное давление смеси.

При проведении испытаний галоидным методом поиск течи проводится путем опрессовки объекта, заполненного хладоном под избыточным давлением, и обдуванием хладоном объекта, в котором поддерживается некоторое разрежение. Принцип действия галоидных течеискателей основан на явлении резкого возрастания эмиссии положительных ионов с платинового электрода, нагретого до 800...900°C в присутствии паров галоидосодержащих веществ (хладона 12 или 22, четыреххлористого углерода, трихлорэтана, соединений иода и фтора).

Чувствительность испытания галоидным течеискателем зависит от давления и концентрации индикаторного газа и изменяется от 0,1 до  $0,5 \cdot 10^{-4}$  л·мм рт.ст./с пробного газа. Поэтому галоидный течеискатель может быть использован для определения мест течи в изделиях, позволяющих создать в них избыточное давление. Чувствительность испытаний определяется по выражению

$$S_a = K \frac{2,4 \cdot 10^{-3}}{\left(\left(\frac{P}{P_a}\right)^2 - 1\right) C},$$

где  $C$  - концентрация хладона в смеси;  $P$  - избыточное давление хладон-воздушной смеси;  $K$  - отношение коэффициентов вязкостей смеси и чистого воздуха.

Контроль герметичности вакуумных систем и их элементов с применением гелиевых течеискателей является среди известных методов наиболее чувствительным и универсальным. В зависимости от требуемой при контроле чувствительности выбираются метод и схема течеискания. При этом учитываются условия работы испытуемого объекта, его конструктивная прочность, конфигурация, размеры, место проведения контроля и т.д. При проведении контроля должны имитироваться рабочие условия изделия: величина и направление газовой нагрузки, температура изделия и другие параметры.

В настоящее время используют следующие методы контроля с помощью гелиевых течеискателей: помещение объекта испытаний в вакуумную камеру; применение гелиевой камеры; вакуумирование испытуемого объекта с последующим обдувом его контрольным газом; применение вакуумных присосок; применение разъемных вакуумных камер; с помощью щупа.

Контроль герметичности с помощью щупа осуществляется при перемещении щупа - натекателя, соединенного с течеискателем, по соединениям испытуемой системы, находящейся под давлением индикаторного газа.

Индикаторный газ при наличии негерметичности засасывается щупом-натекателем в течеискатель, выносной прибор которого отклонением стрелки и изменением тональности звукового сигнала фиксирует утечку контрольного газа. Соединительный трубопровод должен быть герметичным и обладать предельно малым газовыделением и "памятью" по гелию.

Сущность контроля герметичности вакуумированием заключается в том, что над контролируемой поверхностью создается разрежение. Индикаторный газ (гелий или гелиево-воздушная смесь) под действием разности давлений проникает через микронеплотности испытуемого объекта в отвакуумированную полость, которая сообщается с гелиевым течеискателем.

При контроле герметичности способом помещения объекта в вакуумную камеру изделия помещаются в герметичную камеру, соединенную с течеискателем. В случае негерметичности объекта индикаторный газ под действием разности давлений поступает из объекта в полость вакуумной камеры, а затем в камеру масс-спектрометра течеискателя. Чувствительность испытаний определяется следующим выражением:

$$S_a = \frac{Q_{к.т}}{d_{к.т}} d_{min},$$

где  $Q_{к.т}$  — поток гелия от контрольной течи;  $d_{min}$  — достоверный отсчет по стрелочному прибору, равный удвоенной величине флуктуации фона гелия в камере;  $d_{к.т} = d_1 - d_{\phi}$  — разность показаний прибора по потоку гелия от контрольной течи  $d_1$  и фоновых показаний  $d_{\phi}$ .

В основе контроля герметичности способом сравнения с контрольной течью лежит определение величины потока гелия с известной чувствительностью при одинаковых условиях снятия замера от контрольной течи и утечек изделия. Чувствительность испытаний определяется: чувствительностью течеискателя к потоку гелия; распределением потока гелия между течеискателем и вспомогательными средствами откачки; временными характеристиками испытаний.

Контроль герметичности вакуумированием объекта с последующим обдуванием его контрольным газом проводится для поиска локальных течей в малогабаритных лазерах. Способ является индикаторным, не применяется для количественной оценки. В испытуемом объекте создается разрежение, а его наружная поверхность обдувается тонкой струей гелия. При наличии течи гелий проникает в полость изделия, соединенную с масс-спектрометрической камерой течеискателя, что приводит к отклонению стрелки выносного прибора течеискателя.

При контроле герметичности вакуумированием с применением вакуумных присосок на испытуемый участок поверхности изделия устанавливается специальная герметичная камера-присоска, соединенная с откачной системой и течеискателем. Герметичность присоски обеспечивается уплотнением из вакуумной резины. Внутренняя полость камеры вакуумируется до необходимого для контроля давления, а в изделие подается индикаторный газ под избыточным давлением.

Масс-спектрометрический течеискатель представляет собой упрощенный масс-спектрометр, настроенный на регистрацию содержания индикаторного газа в газовой смеси. Наибольшее распространение нашли масс-спектрометрические течеискатели, относящиеся к классу статических масс-спектрометров, в которых разделение ионов осуществляется с помощью постоянных электрических и магнитных полей. Анализаторная часть течеискателей представляет собой цилиндрическую масс-спектрометрическую камеру из немагнитного материала, помещенную между полюсами постоянного магнита. В камере размещен ионный источник, приемник ионов и магнитоизрядный манометр, для работы которого используется внешнее магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом.

Ионный источник состоит из термоэмиссионного катода, камеры ионизатора, выполненной в виде коробки из немагнитного материала, имеющей две щели, и входной диафрагмы. Через верхнюю щель в ионизатор попадают сфокусированные магнитным полем электроны, эмиттируемые с поверхности расположенного над ней накального катода и ускоренные электрическим полем между коробкой ионизатора и катодом, а через боковую выходят ионы, образовавшиеся при столкновениях электронов с молекулами газа и ускоренные напряжением, приложенным между камерой ионизатора и входной диафрагмой.

Выйдя из ионизатора в виде слабонерасходящегося моноэнергетического пучка, ионы попадают в пространство камеры анализатора, где под действием магнитного поля, направленного перпендикулярно плоскости их движения, приобретают круговые траектории, радиус  $R$  которых при неизменном ускоряющем напряжении  $U$  и напряженности магнитного поля  $H$  зависит от массового числа

$$r = m/e ,$$

где  $m$  — масса электрона;  $e$  — его заряд.

Происходит разделение ионного пучка сложного состава на ряд пучков с определенными значениями массового числа  $m$ . На пути движения пучка ионов индикаторного газа устанавливается приемник ионов, состоящий из выходной диафрагмы, супрессора, отсеивающего рассеянные ионы, и коллектора ионов. Угол развертки анализатора на круговой траектории относительно источника выбран равным  $180^\circ$  из условий фокусировки ионного пучка.

Попадая на коллектор, ионы индикаторного газа вызывают протекание электрического тока в его цепи, содержащей высокоомное сопротивление, на котором создается падение напряжения, достаточное для последующего усиления и индикации.

Измеряется интенсивность ионного пучка индикаторного газа, служащая мерой его концентрации в смеси анализируемых газов. Масс-спектрометрическая камера специальным фланцем соединена с вакуумной системой течеискателя, включающей пароструйный насос, форвакуумный механический насос, охлаждаемую азотную ловушку и коммутационную арматуру. В состав вакуумной системы течеискателей входит контрольная течь, необходимая для калибровки течеискателя. Своей вакуумной системой через специальный дросселирующий вентиль течеискатель может быть присоединен к испытываемому объекту.

## 8. СОСТАВЛЕНИЕ МАРШРУТНЫХ КАРТ НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ И РЕМОНТ УСТАНОВОК

К составлению маршрутных карт предъявляются следующие требования: маршрутная карта является основной и неотъемлемой частью комплекса технологических документов, разрабатываемых на технологические процессы изготовления или ремонт изделий или их составных частей;

формы маршрутных карт, установленные стандартом, являются унифицированными и их следует применять независимо от типа и характера производства и степени детализации описания технологических процессов.

Нормаль предусматривает следующие правила применения маршрутных карт:

1. Выбор области применения соответствующих форм маршрутных карт зависит от разрабатываемых видов технологических процессов, специализированных по применяемым методам изготовления и ремонта изделий и их составных частей.

2. При маршрутном и межоперационном описании технологического процесса маршрутная карта является одним из основных документов, в котором описывается весь процесс в технологической последовательности выполнения операций.

3. При операционном описании технологического процесса маршрутная карта выполняет роль своего документа, в котором указывается адресная информация (номер цеха, участка, рабочего места, операции), наименование операции, перечень документов, применяемых при выполнении операций, технологическое оборудование и трудозатраты.

Проведем расшифровку некоторых сокращений, приведенных в графе "Обозначение документа" маршрутной карты:

- СМ — степень механизации;
- Проф — код профессии по классификатору;
- Р — разряд работ, необходимый для выполнения операции;
- УТ — код условий труда по классификатору;
- КР — количество исполнителей, занятых при выполнении операции;
- КОИД — количество одновременно изготавливаемых деталей при выполнении одной операции;
- ЕН — единица нормирования, на которую установлена норма расхода материала или норма времени;
- ЕВ — единица величины по классификатору;
- ОП — объем производственной партии в штуках;

- КИ - количество сборочных единиц, применяемых при сборке изделия;
- ОПП - обозначение подразделения, откуда поступают детали;
- К шт. - коэффициент штучного времени;
- Т п.з. - норма подготовительно-заключительного времени на операцию;
- Т шт. - норма штучного времени на операцию.

Маршрутная карта составляется в соответствии с ГОСТом 3.1118-82.

### Рекомендуемый библиографический список

Оптическая запись и обработка информации /Под ред. В.А.Сойфера. //Автоматизированная технология изготовления фокусаторов ИК-диапазона /Голуб М.А., Карпеев С.В., Мурзин С.П. и др. Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т. 1988. С.14-18.

А р с е н ь е в А.П. Выращивание диэлектрических лазерных кристаллов. М.: Машиностроение, 1986. 153 с.

Б о г д а н о в и ч В.И., Б а р в и н о к В.А., Ц и д у л к о А.Г. Системный анализ технологических методов, применяемых в производстве летательных аппаратов: Учеб. пособие /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 68 с.

Вакуумная техника: Справочник /Под ред. Е.С.Фролова, В.Е.Минаичева. М.: Машиностроение, 1992. 471 с.

Д а н и л е в и ч Ф.М., Н и к и т и н В.А., С м и р н о в а Е.П. Сборка и юстировка оптических контрольно-измерительных приборов. Л.: Машиностроение, 1976. 255 с.

З а к о н н и к о в В.П., Б ы к о в Б.З., Ш т а н д е л ь С.К. Основы автоматизации производства оптических деталей. М.: Машиностроение, 1982. 168 с.

Е в с т и г н е е в М.И., П о д з е й А.В., С у л и м а А.Н. Технология производства двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 480 с.

Единая система технологической документации. ГОСТ 3.1118-82. Формы и правила оформления маршрутных карт. Введен 1.01.84. М.: Изд-во стандартов, 1983.

Изготовление резиновых деталей на предприятиях авиационной промышленности. Произв.инстр. ПИ 1.2.103-79. М.: ВИАМ, 1979.

Д о к т е в а С.Е. Станки с программным управлением и промышленные роботы. М.: Машиностроение, 1986. 319 с.

П е т р о в с к и й Ю.В., Ф а с т о в с к и й В.Г. Современные эффективные теплообменники. М.: Энергия, 1989. 256 с.

Р о т А. Вакуумные уплотнения. М.: Энергия, 1971. 464 с.

Технологические лазеры: Справочник: В 2 т. /Под ред. Г.А.Абильситова. М.: Машиностроение, 1991. Т. 2. 543 с.

Технология самолетостроения: Учебник для авиационных вузов /Под ред. А.Л.Абибова. М.: Машиностроение, 1982. 551 с.

Ш е р с т ю к А.Н. Насосы, вентиляторы, компрессоры. М.: Высш. школа, 1972. 341 с.

Пат. 5103073 США, МКК<sup>2</sup> В23К26/00/. Устройства для лазерной обработки объектов /В.А.Данилов, А.М. Прохоров, И.Н.Сисакян, В.А.Сойфер, В.П.Шурин, В.И.Мордасов, С.П.Мурзин и др.: Заяв. 28.08.87; Приоритет 27.04.89; Опубл. 7.02.92.

# О Г Л А В Л Е Н И Е

Список условных обозначений .....	3
Введение .....	4
I. Изготовление лазерных установок и технологических комплексов .....	5
I.1. Требования к производству лазерных установок и комплексов .....	8
I.2. Построение производственных процессов .....	9
2. Технологические методы обработки, используемые для производства изделий лазерной техники .....	13
2.1. Обработка наружных поверхностей тел вращения...	16
2.2. Обработка отверстий .....	20
2.3. Обработка плоских и фасонных поверхностей, обработка резьбы, зубьев колес и шлицев .....	23
3. Общая характеристика применяемых соединений и сборка технологических лазеров .....	24
4. Изготовление излучателей твердотельных лазеров .....	34
4.1. Методы выращивания твердотельных диэлектрических лазерных монокристаллов .....	34
4.2. Механическая обработка кристаллов для активных элементов твердотельных лазеров .....	39
4.3. Сборка квантрона твердотельного лазера .....	43
5. Производство агрегатов технологических газовых лазеров..	46
5.1. Изготовление теплообменных аппаратов .....	46
5.2. Изготовление осевых вентиляторов технологических лазеров .....	51
6. Производство технологических модулей .....	53
6.1. Изготовление координатных столов технологических модулей .....	54
6.2. Изготовление оптических устройств для транспортировки лазерного излучения .....	57
7. Обеспечение и контроль герметичности узлов лазерных технологических комплексов .....	63
7.1. Обеспечение вакуумной плотности соединений .....	63
7.2. Контроль герметичности .....	68
8. Составление маршрутных карт на изготовление и ремонт установок .....	76
Рекомендуемый библиографический список .....	77

Учебное издание

М у р з и н Сергей Петрович

ПРОИЗВОДСТВО ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Учебное пособие

Редактор Т.И.К у з н е ц о в а  
Техн.редактор Н.М.К а л е н ю к  
Корректор Н.С.К у п р и я н о в а

Лицензия ЛР № 230301 от 28.II.91.

Подписано в печать 16.01.96г.      Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл.печ.л. 4,65. Усл.кр.-отт.4,77. Уч.-изд.л. 4,8.  
Тираж 100 экз.      Заказ 36.

Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Издательство Самарского государственного аэрокосмического  
университета имени академика С.П.Королева.  
443001 Самара, ул. Ульяновская, 18.