

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

# ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Методические указания  
к курсовой работе

САМАРА 1997

Составитель В. И. Мордасов

УДК 621.791.144

**Лазерная обработка материалов:** Метод. указания к курсовой работе / Сост. В. И. Мордасов. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1997. 32 с.

Составленные в соответствии с программой курса "Лазерная обработка материалов" указания определяют цели, задачи и содержание курсового проектирования технологических процессов с применением лазерной обработки: пробивка отверстий, раскрой, сварка, термообработка. Изложение материала сопровождается информационно-справочными данными. Подробно освещено содержание обязательных разделов курсовой работы: конструктивно-технологический анализ деталей, технологические расчеты лазерной обработки, конструирование и расчет оптических систем.

Предназначены для студентов факультета двигателей летательных аппаратов по специальности 1312.

Подготовлены на кафедре АСЭУ

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва

Рецензент С. П. Мурзин

Методические указания составлены в целях оказания практической помощи студентам в самостоятельных занятиях над курсовой работой по лазерной обработке материалов, уточнения ее объема, содержания и предъявляемых требований.

В методических указаниях заложены основы инженерных методов проектирования технологических процессов лазерной обработки: пробивки отверстий, резки, сверки и закалки. Также изложен порядок проектирования технологической оснастки и оптических систем.

#### 1. ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

Техническое задание на курсовую работу должно включать следующие данные:

1. Чертеж обрабатываемой детали с указанием всех размеров, допусков на изготовление, поверхностной твердости обрабатываемых участков, материала и годового выпуска деталей.
2. Технические условия на приемку, на оговоренные чертежом детали.
3. Размеры и вид исходного материала (если данный пункт отсутствует, то проектанту предоставляется право выбора наиболее рационального вида и размеров исходного материала).
4. Вид оборудования (если данный пункт задания отсутствует, то проектант должен подобрать вид оборудования самостоятельно на основании технико-экономического расчета).

## 2. ОБЪЕМ И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа включает проектирование и расчет технологических процессов изготовления детали (или полуфабриката), конструирование и расчет оптической технологической системы, оснастки для позиционирования и контроля размеров детали.

В соответствии с этим курсовая работа выполняется в виде пояснительной записки объемом 20-30 страниц и рабочих чертежей технологической оснастки, оптических систем в количестве 2-2,5 листов (сборочный чертеж и деталировка).

Проектирование технологических процессов лазерной обработки заключается в установлении вида и последовательности основных, вспомогательных (или сопутствующих) и завершающих операций, необходимых для изготовления определенной партии деталей.

## 3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И РАСЧЕТУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Локальный нагрев конструкционных материалов лазерным излучением с высокой экономической эффективностью может применяться в тепловых испытаниях и при изготовлении деталей и узлов различных машин и агрегатов. Мощные технологические лазеры используются как в качестве основного оборудования, так и органа, управляющего процессом [1, 2, 4]. Несмотря на очевидные преимущества лазерных источников тепловой энергии перед традиционными, они широкого применения в технологии машиностроения не нашли. Причина этого очевидна: недостаточное совершенство оптических систем формирования и регулирования пространственного распределения энергии излучения, от которой во многом зависят качество изделий и их эксплуатационные характеристики. Ненормированный лазерный нагрев конструкционных материалов приводит к образованию различных дефектов уже на стадии обработки, таких как пережоги, крупнозернистость, локальные оплавления листовых заготовок, трещинообразование и отслаивание нанесенных покрытий. В то же время требуемый комплекс физико-механических свойств материала в зоне обработки обеспечивается лишь только созданием оптимального распределения температурных полей. В этом плане перспективно применение отражающих элементов плоской оптики (фокусаторов излучения) [3]. Осуществляя выбранное на этапе их расчета преобразование лазерной энергии, фокусаторы представляют возможность сформировать требуемый профиль интенсивности излучения в зоне обработки заданной формы.

Ранее проведенный расчет неподвижных плоских оптических элементов, преобразующих излучение в отрезок прямой для конкретных технологических процессов лазерной обработки изделий, уже позволил разработать конструкции оптических систем. Они позволяют качественно регулировать распределение энергии излучения для некоторых технологических процессов, таких как лазерный отаг листовых металлических полуфабрикатов, спекание защитных и износостойких покрытий, поверхностное упрочнение деталей и др. Однако для расширения технологических возможностей можно рекомендовать использовать подвижные фокусаторы, например, с вращением их вокруг оптической оси.

Целью данной работы является разработка методики и теоретическое обоснование формирования температурных полей при лазерной поверхностной обработке конструкционных материалов с использованием вращающихся фокусаторов, расширение области их применения при проведении тепловых испытаний и лазерного спекания покрытий.

### 3.1. Описание оптической системы

При решении поставленной задачи принимается схема нагрева непрерывным излучением, сфокусированным в неподвижный (установленный перпендикулярно, под углом, параллельно траектории движения) или вращающийся отрезок, а также выполняется условие неоднородного распределения интенсивности излучения по длине отрезка с ее максимумом по краям для выравнивания поля температур по ширине зоны термического влияния. В этом случае при выборе конструкции оптической системы целесообразно осуществить поворот фокусатора излучения, форма отражающей поверхности которого определяется согласно выражению работы [4].

$$z(u, v) = \frac{u^2 - zV}{5,65 f} - \frac{2uL_0}{\pi f} \int_0^u du \int_0^v \frac{\exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{r^2}\right) dv}{\left[\Phi\left(\frac{R}{r}\right)\right]^2}, \quad (1)$$

где  $Z$  - ось, перпендикулярная плоскости элемента;  $u, v$  - координаты продольного и поперечного сечения оптического элемента;  $f$  - расчетное фокусное расстояние;  $L_0$  - первоначальная длина светового отрезка;

$R$  - радиус расчетного пучка излучения;  $r$  - параметр расчетного пучка гауссовского распределения излучения;  $\Phi\left(\frac{R}{r}\right)$  - значение двойного интеграла вероятностей в области определения расчетного пучка.

При повороте на угол  $\varphi$  оптического элемента, отражающая поверх -

ность которого выполнена по формуле (1), происходит поворот светового пятна в фокальной плоскости на угол  $\Psi$ :

$$\Psi_1 = \text{arctg}(\sqrt{2} \text{tg} \varphi). \quad (2)$$

В фокальной плоскости увеличивается средняя величина плотности энергии, распределенной в световой отрезок, и уменьшается длина светового отрезка.

При вращении фокусатора, изготовленного с рельефом и рассчитанного по зависимости (1), изменяется и положение фокальной плоскости. Величина изменения фокусного расстояния  $\Delta f$  при повороте фокусатора на угол  $\varphi$  равна:

$$\Delta f = f \left\{ 1 - \cos [\arcsin(0,71 \sin \varphi)] \right\}. \quad (3)$$

В работе [4] представлены возможные схемы лазерной поверхностной обработки, оптическая схема расчета и график изменения положения фокуса  $\Delta f$ , в зависимости от угла поворота  $\varphi$  фокусатора. Величина изменения интенсивности в точке  $\xi$  в фокальной плоскости, являющейся проекцией прямой  $U=M$ , определяется соотношением

$$\frac{q}{q_0} = \frac{2\gamma}{C_1} \exp\left(-\frac{A_1 M^2}{\gamma^2}\right) \varphi\left(\frac{\sqrt{R^2 - A_1 M^2} + B_1 M}{\gamma C_1}\right) \frac{2\gamma \exp\left(-\frac{M^2}{2\gamma^2}\right) \varphi\left(\frac{\sqrt{R^2 - M^2/2}}{\gamma}\right)}{\quad}, \quad (4)$$

где  $A_1 = \frac{1}{1 + \cos^2 \varphi}$ ;  $B_1 = \frac{\cos \varphi \sin \varphi}{\sqrt{2(1 + \cos^2 \varphi)}}$ ;

$$C_1 = \sqrt{\cos^2 \varphi + \frac{1}{2} \sin^2 \varphi}.$$

В работе [4] приводится конструкция устройства для вращения фокусатора излучения, имеющего систему водоохлаждения. Данное устройство может быть использовано для управления формой зоны лазерного воздействия и распределения энергии в пучке излучения, генерируемого типовыми лазерными технологическими установками. Фокусатор излучения представляет собой профилированную отражающую пластину с микрорельефной структурой рабочей поверхности.

Микрорельеф поверхности определяется в зависимости от заданной формы зоны обработки, распределения в ней интенсивности излучения, синтезируется с учетом длины волны  $\lambda$ . Микрорельеф фокусатора рассчитывается на ЭВМ и имеет довольно сложную конфигурацию. Высота его микрорельефа изменяется в диапазоне значений от 0 до  $\lambda/2$ . Процесс изготовления фокусатора включает следующие этапы: построение математической мо-

дели, получение аналитических зависимостей и расчет на ЭВМ оптического элемента по назначению, получение амплитудной маски, изготовление реплики фокусатора, напыление металлического слоя с последующим электролитическим наращиванием оптического элемента. Из учета себестоимости производства фокусаторы излучения выполняются из меди.

### 3.2. Проведение тепловых испытаний конструкционных материалов

Создание новых перспективных материалов, предназначенных для изготовления сложных технических систем, функционирующих в условиях вакуума, воздействия солнечной радиации и тепловых потоков, требует проведения обширной программы испытаний. В последнее время для исследований интенсивного теплового нагрева широко используются лазерные излучатели. С их помощью осуществляют как изучение процессов взаимодействия излучения с конструкционными материалами, так и проводят тепловые испытания. Однако осуществление подобных исследований непосредственно на выпускаемой промышленностью технологических лазерных установках затруднено из-за низкой вооруженности их измерительной аппаратурой.

К основным параметрам, характеризующим взаимодействие лазерного излучения с веществом, относятся: поверхностная плотность лучистого потока  $q$ , поверхностная плотность энергии излучения  $E$  и длина волны излучения  $\lambda$ . Важными параметрами также являются пространственная однородность плотности лучистого потока на мишени и поперечный размер пучка.

Стенд для проведения тепловых испытаний должен в себя включать излучатель, например, технологическую установку "ЛАТУС-31" с длиной волны излучения 10,6 мкм. Визуальный контроль диаметра и однородности пучка осуществляется введением в оптический тракт люминесцентного визуализатора инфракрасного излучения ( $\lambda = 10,6$  мкм)  $\text{CO}_2$ -лазера ВЛ-1 и промышленной телевизионной установки ПТУ-40-1. При закрытой заслонке зеркало отбрасывает поток излучения на люминесцентный экран визуализатора, который находится в поле зрения телекамеры. Структура распределения плотности мощности в пятне отображается на экране видеоконтрольного устройства.

Для исследования образцов, имеющих малую теплопроводность, можно ограничиться небольшим диаметром пучка. Тогда предусмотрено использование отпаянного  $\text{CO}_2$ -лазера ЛГН-702, пучок которого вводится в оптический тракт с помощью подвижного зеркала. Измерение диаметра пучка производится с экрана видеоконтрольного устройства с использованием координатной

сетки. Чтобы учесть влияние расходимости  $\theta$ , расстояния от заслонки мишени  $l_1$  и от заслонки до экрана визуализатора  $l_2$  равны. При этом погрешность в измерении диаметра  $\Delta d_1$  определяем как

$$\Delta d_1 = \Delta d_2 + \Delta\theta(l_1 + l_2) + 2\theta\Delta l, \quad (5)$$

где  $\Delta d_2$  - погрешность в измерении диаметра плёнки на экране визуализатора;  $\Delta\theta$  - погрешность измерения расходимости;  $\Delta l$  - погрешность измерения расстояний. Из выражения (5) видно, что при расстояниях  $l_1 = l_2$  второе слагаемое, содержащее расходимость  $\theta$ , равно 0. Расходимость не вносит при измерении диаметра  $d_1$  существенных поправок. С другой стороны, расходимость излучения, используемого в стенде технологической установки "ЛАТУС-31", не превышает  $10^{-2}$  рад. Разница между  $d_1$  и  $d_2$  для  $\theta = 10^{-2}$  в зависимости от разности  $(l_1 - l_2)$  приведена в табл. I.

Т а б л и ц а I

Величина разности диаметров от значения  $\Delta l$

$\theta = 10^{-2}$ рад	$\Delta l = (l_1 - l_2)$ , мм					
	1	2	5	10	20	50 100
$(d_1 - d_2)$ , мм	$10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$	0,1	0,2	0,5 1

На основании данных табл. I можно сделать вывод, что вполне допустима разница оптических путей  $l_1$  и  $l_2 \sim 1$  см. В этом случае размер пучка на мишени  $d_1$  и на люминесцентном экране визуализатора составит менее  $10^{-4}$  м даже при явно завышенном значении расходимости более чем  $\theta = 10^{-2}$  рад.

Среднеквадратическая погрешность при измерении плотности энергии излучения определяется как

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta W}{W}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d_1}{d_1}\right)^2}, \quad (6)$$

где  $E$  - плотность энергии излучения на мишени;  $T$  - величина пропускания окна вакуумной камеры;  $W$  - мощность излучения;  $\tau$  - время экспозиции;  $\Delta T$ ,  $\Delta W$ ,  $\Delta \tau$ ,  $\Delta d_1$ ,  $\Delta E$  - среднеквадратические погрешности соответствующих величин.

Учет величины  $\Delta\theta(l_1 - l_2) + 2\theta\Delta l$  вносит погрешность  $\Delta d_2$ ; при

$\Delta\theta \approx \theta \cdot 10^{-2}$  рад,  $l_1 - l_2 = 10 \cdot 10^{-2}$  м,  $\Delta l_1 = 10^{-3}$  м она может составить  $0,12 \cdot 10^{-3}$  м. При этом погрешность измерения диаметра пятна на экране люминесцентного визуализатора с помощью телекамеры и видеомонитора  $\Delta d_2$  будет в свою очередь складываться из погрешности градуировки экрана видеомонитора  $\Delta d_2''$  и погрешности определения края пятна  $\Delta d_2 = \Delta d_2' + \Delta d_2''$ . Оценить минимальную погрешность  $\Delta d_2$  можно из следующих условий. Разрешение промышленной телевизионной установки ПТУ-40-1 составляет не менее 400 линий и 7 градаций яркости. Максимальный размер изображения равен 300 мм, следовательно, минимальная относительная погрешность градуировки  $\Delta d_2'/d_2 = 0,0025$ , что при диаметре пятна  $d_2 = 3 \cdot 10^{-3}$  м дает  $\Delta d_2' = 0,075 \cdot 10^{-3}$  м.

Из-за дифракционных явлений на краях калиброванной диаграммы граница пятна теряет контраст. Для диаметра диафрагмы  $(15-30) \cdot 10^{-3}$  м при длине волны лазерного излучения  $\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6}$  м граница пятна представляет собой дифракционную картину, сходную с дифракцией Френеля на прямолинейном крае экрана. Тогда расстояние от края геометрической тени до первого светового кольца, которое определяет погрешность в отыскании края пятна, составит

$$\Delta d_2'' = \sqrt{\frac{3\lambda(l_1 + l_2)}{4}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 10,6 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3}{4}} = 2,82 \text{ мм}, \quad (7)$$

где  $l_2$  - расстояние от калиброванной диафрагмы до заслонки.

Таким образом, дифракционная составляющая погрешности будет определяющей в измерении пятна. Предлагаются следующие пути снижения погрешности измерения диаметра пучка: аподизирующие диафрагмы, многоградационная обработка изображения пучка на ЭВМ.

Пропускание окна вакуумной камеры Т оценим расчетным методом. Окно изготовлено из хлористого калия и представляет собой плоскопараллельную пластинку, излучение на которую падает перпендикулярно. Собственное поглощение хлористого калия для  $\lambda = 10,6 \cdot 10^{-6}$  м составляет всего  $2 \cdot 10^{-3}$ , т.е. следует учитывать потери на отражение от двух поверхностей раздела "воздух КСл и КСл - воздух". Пропускание пластинки в этом случае задается выражениями

$$T = (1 - \rho)^2 \cdot \rho \cdot \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2, \quad (8)$$

где  $n$  - показатель преломления хлористого калия при  $\lambda = 10,6$  мкм. Подстановка  $n = 1,45$  в выражение (8) дает значение  $T = 0,93$ , что

не противоречит экспериментальным данным. Полученное в ходе настоящего исследования пропускание окна составляет  $0,9 \pm 0,1$ .

В случае, если тепловые испытания с равномерным распределением плотности излучения проводятся с нагревом значительной площади образца, то применяют фокусаторы излучения. Возможные схемы лазерного нагрева приведены в работе [4]. В табл. 2 приводятся результаты тепловых испытаний для гетерогенных покрытий и материалов. В каждом случае тепловое влияние по-разному изменяет эксплуатационные характеристики материалов. При воздействии на покрытия происходит улучшение их адгезионных свойств, а при нагреве теплоизоляционных материалов уменьшается их циклическая прочность.

Т а б л и ц а 2  
Изменение свойств материала

Вид материала	Свойства материала	
	без нагрева	с нагревом
Теплозащитное покрытие на основе силикатной связки с наполнителем ( $ZrO_2, MgO, ZnO$ ), полученное струйным напылением, толщиной 100 мкм, подложка: алюминий толщиной 2 мм	Адгезионная прочность покрытия $\sigma$ , кгс/мм <sup>2</sup> 0,0055-0,0065	Адгезионная прочность покрытия $\sigma$ , кгс/мм <sup>2</sup> 0,0085-0,0105 Нагрев излучением плотностью $q = 10^5$ Вт/м <sup>2</sup> , длительность нагрева $\tau = 5$ с, $\lambda = 10,6$ мкм
Теплоизоляционная стеклоткань	Циклическое нагружение Разрушение на базе .45000 циклов отсутствует	Наблюдается разрушение при следующем количестве циклов <u>26000*</u> 28000 Нагрев излучением плотностью $q = 10^6$ Вт/м <sup>2</sup> , Длительность нагрева $\tau = 1$ с, $\lambda = 10,6$ мкм

Примечание. В числителе приведены результаты циклических испытаний на изгиб  $\psi = 90^\circ$  при радиусе закругления оправки  $r = 10$  мм, в знаменателе - результаты циклических испытаний на кручение  $\psi = 90^\circ$  при рабочей базе пятикратного образца  $l = 50$  мм при осевом растяжении напряжением  $\sigma = 0,04$  кгс/мм<sup>2</sup>.

### 3.3. Спекание покрытий

Отработка технологии лазерного спекания покрытий с помощью фокусаторов излучения проводилась с целью улучшения эксплуатационных характеристик изделий различного назначения. В качестве технологической установки использовался промышленный комплекс ТЛУ-1000. В табл. 3 описаны значения микротвердости сталей, используемых для изготовления инструмента, легированных аморфным бором, боридом титана, карбидом хрома при лазерном нагреве. После лазерной обработки покрытия, нанесенного газотермическим напылением, не возникает пор, трещин, осуществляется приварка покрытия к подложке. Вновь образованная при этом в зоне оплавления структура отличается мелкодисперсностью фаз. В некоторых случаях увеличение микротвердости поверхности деталей после лазерной обработки может быть существенным (образец из стали У8 с покрытием из карбида титана имеет HV 12900...14300 МПа).

При лазерной обработке участка цилиндра двигателя с внутреннего сгорания из литейного алюминиевого сплава (Mg - 0,17...0,3%, Si - 8...10,5%, Mn - 0,25...0,5%) с газотермическим покрытием на основе никеля и карбида титана (Ni - 30...35%, Ti - 65...70% Ni - 80...85%, прослойка из алюминиды никеля) по разработанной технологии также не образуется пор, трещин. Образующаяся при этом в зоне оплавления квазиэвтектическая структура, отличающаяся мелкодисперсностью фаз. Для оптимальных режимов характерно незначительное (глубиной до  $0,05 \text{ м}^{-3}$ ) оплавление покрытия без значительного ухудшения микрогеометрии его поверхности. Так как рекомендуемая толщина покрытия с подслоем перед шлифовкой не превышает  $0,5...0,6 \text{ м}^{-3}$ , целесообразно проводить лазерную обработку перед механической. При этом адгезионная прочность износостойкого покрытия на основе никеля и карбида титана, нанесенного методом плазменного напыления на подложку из алюминиевого сплава, увеличивается минимум на 20...25%.

### 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ И РАСЧЕТУ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

При выборе типа крепления и разработке конструкции узла необходимо обеспечить выполнение следующих общих требований:

крепление должно быть надежным, т.е. во время работы прибора положение оптической детали относительно оправы не должно изменяться;

замыкающие усилия, необходимые для осуществления сопряжения между оптической деталью и оправой, не должны вызывать опасных деформаций и напряжений;

Поверхностная микротвердость сталей, легированных аморфным бором, боридом титана, карбидом хрома, карбидом вольфрама

Марка сталей	Глубина зоны воздействия, м	Глубина зоны упрочнения, м	Микротвердость HV, МПа	
			после лазерной обработки	исходная
Покрyтие: аморфный бор				
У8	$0,34 \cdot 10^{-3}$	$0,24 \cdot 10^{-3}$	11000...13600	6800...7100
X12M	$0,56 \cdot 10^{-3}$	$0,28 \cdot 10^{-3}$	11200...12900	6800...7200
X6Cr	$0,27 \cdot 10^{-3}$	$0,20 \cdot 10^{-3}$	9300...10200	6800...7100
Покрyтие: борид титана				
У8	$0,30 \cdot 10^{-3}$	$0,15 \cdot 10^{-3}$	8240...10200	6800...7100
X12M	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,11 \cdot 10^{-3}$	9000...10250	6800...7200
X6Cr	$0,14 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-3}$	9300...10200	6850...7100
Покрyтие: карбид хрома				
У8	$0,21 \cdot 10^{-3}$	$0,19 \cdot 10^{-3}$	9760...10700	6800...7100
X12M	$0,27 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-3}$	9900...10200	6800...7200
X6Cr	$0,17 \cdot 10^{-3}$	$0,14 \cdot 10^{-3}$	10700...11200	6850...7100
Покрyтие: карбид вольфрама				
У8	$0,49 \cdot 10^{-3}$	$0,42 \cdot 10^{-3}$	12900...14300	6900...7100
X12M	$0,30 \cdot 10^{-3}$	$0,14 \cdot 10^{-3}$	11500...12900	6800...7200

Примечания. Способ предварительного нанесения покрытия на поверхность образцов - плазменное напыление.

Базовая основа узла, ориентирующие и крепежные детали или их элементы должны быть расположены вне габаритов светового пучка. Поверхности этих элементов, находящиеся вблизи пучка, не должны быть причиной появления рассеянного света и бликов в системе;

крепления должны быть технологичны как в отношении изготовления деталей, так и в отношении сборки.

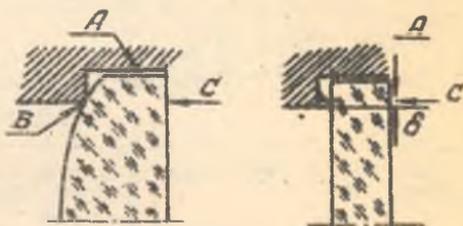
Типичными видами соединений являются соединения оптических деталей с механическими, к функционированию которых предъявляются очень жесткие требования по точности, надежности, стабильности и характеристикам силового режима. Поэтому при разработке конструкции крепления оптических деталей следует руководствоваться перечисленными ниже основными принципами конструирования:

соединение оптической детали с элементами узла, обеспечивающими базирование и ориентирование, должно быть статически определенным;

ограничение смещений оптической детали в узле должно осуществляться преимущественно поверхностями, расположенными перпендикулярно к направлению этих смещений;

ограничение поворотов (перекосов) оптической детали должно осуществляться элементами крепления, расположенными на наибольшем удалении в пределах габаритов оптической детали.

Крепление круглых оптических деталей. Край оптической детали образуется в виде сочетания поверхностей вращения: цилиндрической (центрирующей) и поверхностей фасок (вспомогательных). К таким деталям относятся: линзы, светофильтры, сетки, задитные стекла, иногда круглыми бывают и зеркала. При любом методе крепления круглых оптических деталей цилиндрическая поверхность детали должна находиться в соприкосновении с такой же внутренней поверхностью справа (рис. 1), табл. 4-6.



Р и с. 1. Крепление круглых оптических деталей

Справа для крепления круглой оптики обычно изготавливаются из сталей, алюминиевых сплавов и латуни. Коэффициенты линейного расширения этих материалов и оптического стекла имеют существенное отличие (в 2-3 раза). Поэтому для больших перепадов температуры величина посадочного зазора должна быть проверена на отсутствие натяга в посадке оптической детали для нижнего предела температурного интервала и, в случае необходимости,

Т а б л и ц а 4  
Соединение круглых оптических деталей с оправами.  
Допуски и посадки

Точность центрирования		Д о п у с к и			Примеры применения
		на диаметры оптических деталей		на внутренний диаметр оправы	
Характеристика	Допуск на децентрировку, мм	центрирующих	нецентрирующих		
Повышенная	До 0,02	$h8(C_3)$	$d9(Ш_3)$	$H9(A_3)$	Линзы микроскопических объективов
		$\frac{g6(A)}{f7(X)}$	$d11(X_4)$	$H7(A)$	
Средняя	Св. 0,02 до 0,05	$h8(C_3)$	$d9(Ш_3)$	$H9$	Линзы окуляров
		$\frac{e9}{f9, e8}(X_3)$	$c11(A_4)$	$\frac{H8}{H9}$	
				$(A_3)$	Оптика телескопических приборов, сетки, шкалы
Пониженная	Св. 0,05	$d11(X_4)$	—	$H11(A_4)$	Конденсаторные линзы, светофильтры, плоские зеркала, защитные стекла

Т а б л и ц а 5  
Допуски на посадочные диаметры деталей,  
покрываемых эмалью

Посадочный диаметр детали, мм	Рекомендуемые поля допусков	
	до покрытия	после покрытия
Свыше 3 до 6 >> 6 >> 180	(A) (X)	$g6, h8(A, C_3)$
Свыше 3 до 6 >> 6 >> 180	(Ш) (A)	$f7(X)$

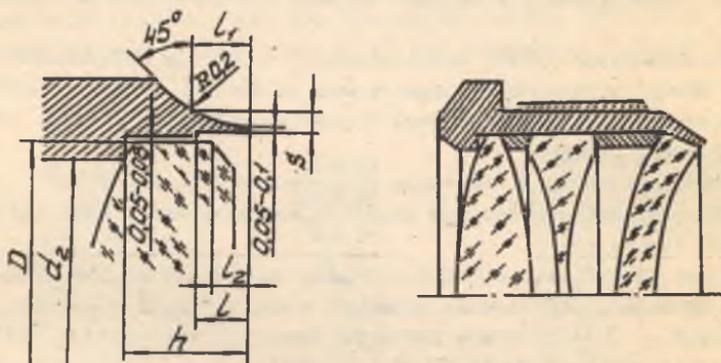
зазор должен быть увеличен. Однако при нагревании до верхнего предела температурного интервала зазор может достичь величины, недопустимой с точки зрения точности центрирования.

К р е п л е н и е з а в а л ь ц о в к о й. При этом способе оптическая деталь удерживается в оправе тонкой ее кромкой, которая приоб-

Толщина слоя эмали в зависимости от диаметра детали

Посадочный диаметр детали, мм	Толщина слоя эмали, мм
Свыше 3 до 10	0,008...0,012
>> 10 >> 30	0,010...0,016
>> 30 >> 80	0,012...0,020
>> 80 >> 180	0,016...0,025

ретаает конечную форму в результате пластического деформирования металла во время завальцовки. Такое крепление является неразъемным. Крепежная кромка оправы после завальцовки находится в сопряжении с конусной поверхностью специальной фаски, сошлифованной на детали под углом  $45^\circ$ , при этом она не должна выступать за пределы фаски (рис. 2), табл. 7.



Р и с. 2. Крепление оптических деталей завальцовкой

Крепление завальцовкой применяется для оптических деталей диаметром до 80 мм и для склеенных блоков до 50 мм. Такое ограничение объясняется тем, что крепежная кромка предельной толщины в 0,5 мм не в состоянии обеспечить необходимую надежность крепления для тяжелых деталей, в особенности при наличии перегрузок (вибрация, тряска, удары).

Материалы оправ при этом методе крепления должны обладать высокой пластичностью. Наилучшим является латунь ЛС59-1; применяются также: латунь Л62, дюралюминий марок Д1, Д6, Д16, низкоуглеродистые конструкционные стали (Ст.20, Ст.30).

Т а б л и ц а 7

Размеры элементов оправ под завальцовку

D	s	l	l <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>
До 10	от 0,2 до 0,3	0,3 - 0,4	1,6	0,3
Свыше 10 до 30		0,5 - 0,7	2,0	0,5
Свыше 30 до 50	от 0,3 до 0,4	1,0 - 1,2	2,5	0,8
Свыше 50 до 80	от 0,4 до 0,5	1,2 - 1,6	3,0	1,0

Типовые примеры крепления завальцовкой:

отрицательной линзы малого диаметра, закрепленной в оправе, имеющей базовые поверхности в виде цилиндрической наружной поверхности и двух параллельных плоских торцов, перпендикулярных оси линзы;

линзового склеенного блока (например, объектива телескопической системы), закрепленного в оправе, имеющей крепежную резьбу и опорный буртик;

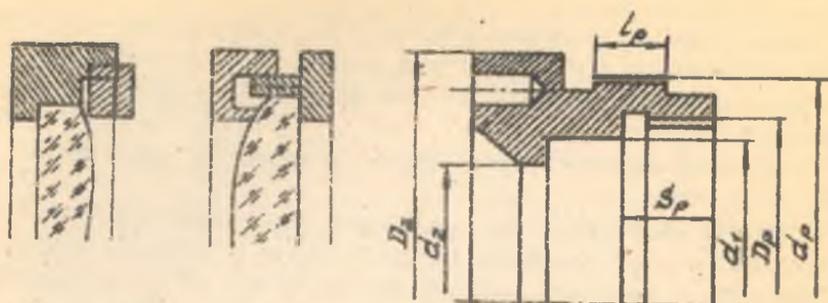
плосковыпуклой линзы, завальцованной в оправу аналогичной конструкции, причем завальцовка осуществлена со стороны буртика оправы;

системы трехсклеенных линз и двух промежуточных колец, закрепленных в общей оправе;

плоскопараллельной пластинки с приклеенной к ней линзой в оправе, базовыми поверхностями которой являются наружная цилиндрическая и две плоскости торцов.

На рис. 3 изображены типовые оправы для крепления резьбовыми кольцами. Примерные соотношения размеров в мм:  $d_1 = D$ ,  $d_2 = D_1 + 0,2$ , где  $D$  - полный и  $D_1$  - световой диаметры линзы;  $D_p \geq d_1 + 0,2 + 2H_1$ , где  $H_1$  - высота профиля резьбы ( $H_1 \approx 0,54 P$ );  $d_p = (6 - 10)P$ ;  $D_2 = d_p + (2 - 10)$  ( $d_p$  определяется особенностями конструкции всего узла);  $l_p = (6 - 10)P$  - шаг внутренней и наружной резьбы соответственно. Обычно применяется мелкая резьба с шагом 0,5; 0,75; 1 мм в зависимости от толщины стенки оправы и кольца. При креплении линз больших диаметров применяется резьба и с более крупным шагом. Там же представлены резьбовые кольца наиболее распространенных типов. Соотношения их размеров определяются геометрией посадочных мест оправы под кольцо и световым диаметром линзы на ее рабочей поверхности со стороны кольца.

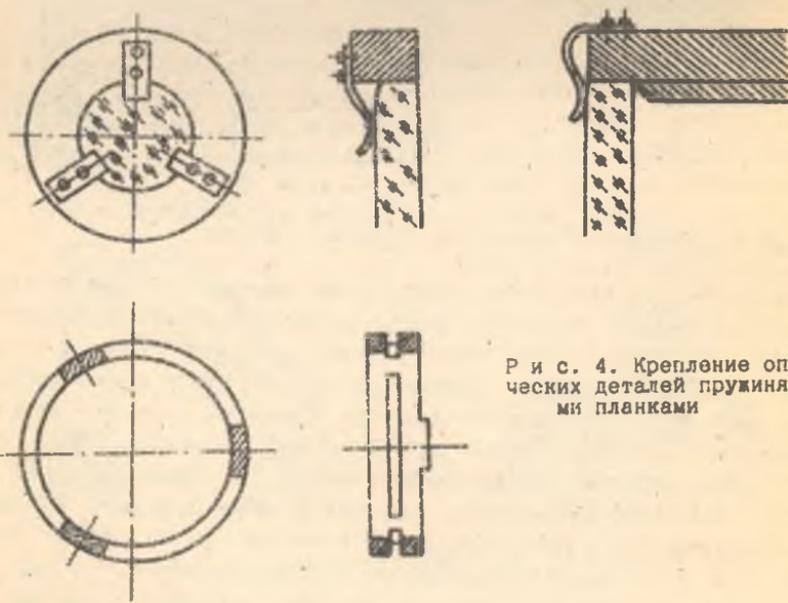
Кроме материалов, используемых при креплении деталей завальцовкой, для изготовления оправ, резьбовых и промежуточных колец могут применяться автоматные стали А12, А20, закаленный дюралюминий Д1Т, ДБТ, Д16Т. Для оправ в серийном производстве могут применяться литейные алюминие-



Р и с. 3. Крепление оптических деталей резьбовыми кольцами

вые сплавы АЛ2, АЛ9, АЛ13. Для пружинных колец применяют обычно стали: сталь 40, сталь 50.

Крепление пружинящими планками. На рис. 4 показаны некоторые варианты крепления круглых оптических деталей пружинящими планками. Здесь также могут быть применены и другие приемы крепления:



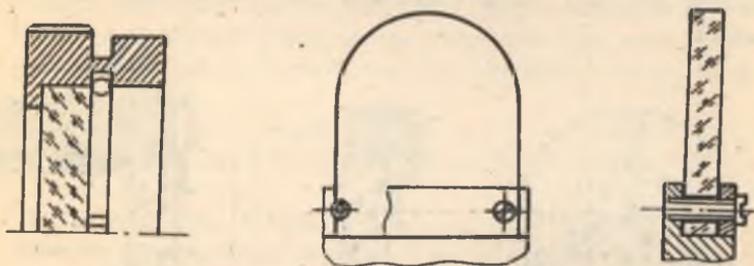
Р и с. 4. Крепление оптических деталей пружинящими планками

трия радиально расположенными планками, каждая из которых прикрепляется двумя винтами к широкому фланцу оправы; концы планок нажимают на выступающую поверхность детали; вариант невыгоден в отношении поперечных габаритов узла;

пружинящими планками, прикрепленными к лыскам на стенке оправы снаружи;

светофильтра накладным кольцом с тремя пружинящими выступами; круглого зеркала накладным кольцом с шестью пружинящими элементами; линзы тремя специальными пружинящими планками, прикрепленными винтами к внутренней поверхности стенки оправы.

Крепление пружинящими планками целесообразно применять для оптических деталей большого диаметра (80 мм и более), так как при этом относительное увеличение габаритов узла будет невелико. Однако некоторые варианты конструкций могут использоваться в некоторых случаях и для малого диаметра. Прижимные планки изготавливают из сталей марок 65Г и У8А.



Р и с. 5. Крепление оптических деталей проволочным кольцом и консольное крепление зеркала

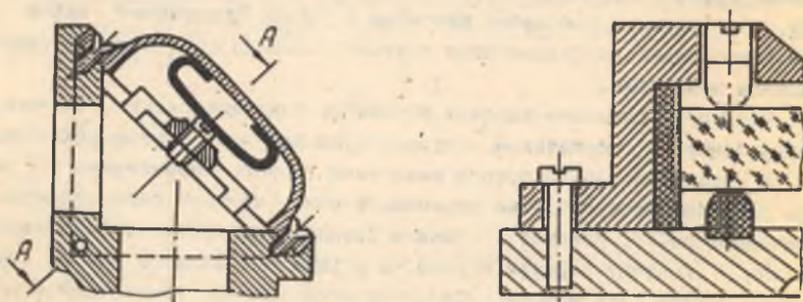
На рис. 5 приведен пример конструкций крепления круглых деталей проволочным кольцом. Из рисунка ясно, что оптическая деталь находится между уступом оправы и выступающей частью проволочного кольца, помещенного в специальную канавку. Канавка обычно выполняется в виде прямоугольного сечения. Ее ширина равна диаметру проволоки, глубина - половине диаметра. Для облегчения сборки развернутая длина кольца должна быть такой, чтобы между его концами после установки в канавку оставался промежуток в несколько миллиметров. Наружный диаметр свободного кольца (до сборки) должен быть больше внутреннего диаметра канавки. Кольца изготавливаются из пружинной проволоки; ее диаметр (обычно 0,5-1,5 мм) зависит от размера оптической детали. Во избежание выколок сопряжение оптической детали и кольца должно осуществляться по поверхности ее

фаски. Из-за наличия отклонений в размерах глубины расточки и ширины канавки в оправе, а также толщины детали по краю это сопряжение возможно только с осевым зазором, в пределах которого оптическая деталь может смещаться и перекашиваться.

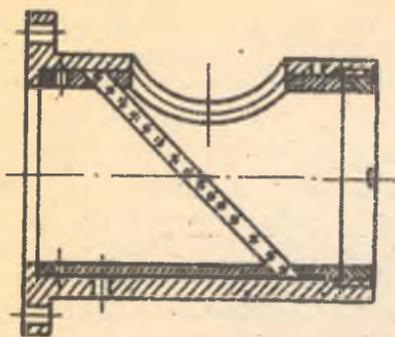
Крепление зеркал любой конфигураций с помощью прижимных планок (лапок). В этом случае оправой является плоская деталь, у которой имеются три выступающие площадки, являющиеся опорами для зеркала. Иногда эти опоры выполняются в виде прокладок из алюминиевой или латунной фольги. Прижимные планки закрепляются на оправе таким образом, чтобы их замыкающие элементы воздействовали на зеркало в местах, определяемых расположением опор. Так как планки жесткие, то эластичность крепления обеспечивается специальными прокладками, устанавливаемыми между планками и зеркалами.

Консольное крепление. Оно применяется для крепления зеркал, работающих в качестве светоделителей, и должно выполняться на таком удалении от рабочей зоны зеркала, чтобы деформации, вызываемые креплением, не влияли на качество его поверхности. Закрепленный край зеркала обязательно базируется на оправе через прокладку (рис. 5); эластичные прокладки нужны и в местах контакта крепежных деталей. В особенности это важно для зеркал, испытывающих перегрузки, например, в момент фиксации переключающегося зеркала.

При особо жестких требованиях в отношении деформаций зеркала для крепления используют специальные, предусмотренные на нем выступы (рис. 6). В случае крепления зеркала пентагонального отражателя полированная плоскость выступов находится в сопряжении с притертыми площадками оправы; прижимные планки воздействуют на зеркало через эластичные прокладки.



Р и с. 6. Крепление зеркал при жестких требованиях к деформации



Р и с. 7. Крепление зеркала в трубе

Крепление зеркала в трубе. Такой вариант крепления показан на рис. 7. Чаще всего так закрепляются наклонные зеркала, расположенные под углом  $45^\circ$  к оси трубы. Боковая поверхность зеркала - цилиндрическая; она сошлифована в приспособлении при наклоне заготовки на  $45^\circ$  по отношению к оси вращения. Рабочая отражающая поверхность зеркала ограничена эллипсом, малая ось которого равна посадочному диаметру оправы. Зеркало базируется на наклонную плоскую кромку опорной

штулки, предварительно вставленной в оправу. После регулировки по углу поворота втулка стопорится. Крепление зеркала осуществляется с противоположной стороны посредством подобной же втулки только с отверстием для прохода отраженного света. Эта втулка может фиксироваться резьбовым кольцом или винтом. Возможны деформации зеркала от неравномерного зажатия и температурных влияний. Качество крепления может быть улучшено при использовании пружинного кольца, которое должно быть установлено между резьбовым кольцом и прижимной втулкой.

**Фокусировочные механизмы.** Они предназначены для получения резкого изображения объекта в контрольно-тестировочных устройствах. Обычно фокусировочные механизмы состоят из раздельно функционирующих механизмов для грубого и тонкого перемещения. В качестве механизма грубого перемещения чаще всего используют зубчато-реечную передачу, состоящую из косозубой шестерни и рейки. Применение такой передачи обусловлено необходимостью получить плавное перемещение ведомого элемента механизма.

Плавность движения ведомых элементов фокусировочных механизмов является основным требованием, которое предъявляется к этим механизмам.

В схеме рычажно-винтового механизма тонкого перемещения [6] вращением рукоятки поступательно перемещают винт, который своим фланцем поворачивает рычаг. Поворот рычага вызывает поступательное движение каретки. Контакт каретки с рычагом и рычага с фланцем винта, осуществляемый парами I-го класса, обеспечивается силовым замыканием с помощью пружины. Кинематические параметры рассматриваемого механизма таковы: шаг винта - 0,5 мм, отношение длин плеч колесчатого рычага  $t_1 : t_2 = 1:2$ .

Рабочий диапазон перемещения каретки составляет 3-2 мм. За один оборот рукоятки каретки перемещается в своих направляющих на 0,25 мм. Для уменьшения мертвого хода в механизме коленчатый рычаг следует подвесить на упругом крестовидном шарнире.

Фокусирующие системы инфракрасных приборов должны удовлетворять ряду требований: они должны иметь:

малые габариты, определяемые жесткими требованиями к габаритам прибора в целом;

максимально возможное относительное отверстие, равное отношению диаметра объектива к его фокусному расстоянию;

определенный угол поля зрения, зависящий от назначения прибора;

минимальные потери для длин волн, соответствующих выбранному диапазону;

минимальные размеры изображения в фокальной плоскости объектива без существенных искажений при перемещении цели к краю поля зрения;

малое виньетирование при перемещении цели к краю поля зрения;

стабильность оптических свойств при различных климатических условиях, а также при работе в условиях тряски и вибраций.

**Фокусирующие системы.** Основным элементом фокусирующей системы является объектив - совокупность линз или зеркал, создающих изображения на чувствительной площадке приемника излучения. В инфракрасных приборах применяют три типа фокусирующих систем: линзовую, зеркальную и зеркально-линзовую. Линзовая фокусирующая система состоит из объектива и конденсатора. Если представить объектив в виде эквивалентной линзы, то схема прохождения лучей через эту линзу имеет вид, показанный на рис. 8, табл. 8.

Входным зрачком системы является объектив, выходным зрачком - окно приемника излучения. Так как центры обоих зрачков являются сопряженными точками относительно главных плоскостей конденсатора, то приведем следующие соотношения:

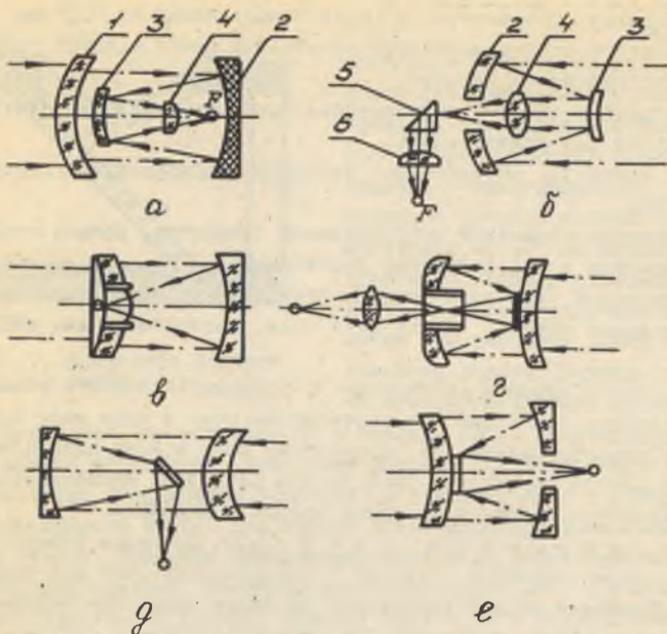
$$(f_n - f_k)(f_{cd} - \Delta) = f_n^2, \quad \frac{d_n}{D_{cd}} = \frac{f_n}{f_{cd} + f_n - \Delta},$$

откуда находим

$$f_n = \frac{f_{cd} + f_k - \Delta}{f_{cd} - \Delta} f_n; \quad \frac{d_n}{D_{cd}} = \frac{f_k}{f_{cd} - \Delta}.$$

Кроме того, для определения свободного диаметра конденсатора имеем условие

$$d_k = D_{cd}(f_c - \Delta)/f_{cd} + 2 \operatorname{tg} \beta (f_{cd} + f_k - \Delta).$$



Р и с. 8. Зеркально-линзовые фокусирующие системы:  
 1 - объектив; 2 - первичное зеркало; 3 - вторичное зеркало; 4 - корректирующая линза; 5 - призма;  
 6 - фокусирующая линза

Т а б л и ц а 8  
 Зеркально-линзовые фокусирующие системы  
 для инфракрасной области спектра

Диапазон длин волн $\Delta\lambda$ , мкм	Расчётная длина волны $\lambda_p$ , мкм	Фокусное расстояние $f_{об}$ , мм	$\frac{f_{об}}{D_{об}}$	Угловая разрешающая способность, мрад	Номер рисунка с эскиза
0,4...0,2	1,2	254	1,6	0,88...2,61	8,а
1,0...4,0	2,5	244	1,6	1,5	8,б
1,0...3,0	2,0	152	1,8	1 при 0° 8 при 10°	8,г
1,0...3,0	2,0	104	1,4	1 при 0° 8 при 10°	8,е

Примечание. 0° и 10° - углы наклона пучков.

Из приведенных формул следует, что минимальные поперечные габариты фокусирующей системы получаются, если принять  $f_k = \Delta$ . В этом случае имеем

$$f_n = \frac{f_{of} f_k}{(f_{of} - f_k)}; \quad \frac{d_n}{D_{of}} = f_k (f_{of} - f_k); \quad d_k = f_{of} 2 \operatorname{tg} \beta.$$

Условие  $f_k = \Delta$  выполнить точно практически не удастся, так как в фокальной плоскости объектива размещена модулирующая диафрагма. Последние формулы могут служить лишь для ориентировочных расчетов.

Диаметр конденсатора  $d_k$  зависит от угла поля зрения  $2\beta$ ; лучшими с точки зрения уменьшения габаритов системы при данном угле  $2\beta$  будут те положения конденсатора, при которых изображение цели находится между конденсатором и его передним фокусом.

Энергетическая освещенность в плоскости изображения от удаленного на большое расстояние объекта определяется следующей формулой:

$$E = \frac{\pi B \tau_\phi}{4 (f_{of} / D_{of})^2},$$

где  $B$  - энергетическая яркость объекта;  $\tau_\phi$  - коэффициент пропускания фокусирующей системы;  $f_{of}$  и  $D_{of}$  - фокусное расстояние и диаметр объектива.

Для увеличения освещенности в плоскости изображения целесообразно уменьшать отношение  $f_{of} / D_{of}$ , но при этом следует иметь в виду, что изображение удаленного точечного объекта получается в виде конечного пятна рассеивания, размеры которого также зависят от отношения  $f_{of} / D_{of}$ . Рассмотрим этот вопрос несколько подробнее.

Известно, что даже хорошо скорректированные оптические системы имеют погрешности (абберации), вследствие которых изображение удаленной точечной цели в плоскости изображения представляет собой пятно рассеивания.

Основными видами абберации являются:

сферическая абберация, заключающаяся в том, что пучок лучей от светящейся точки, находящейся на оси линзы, собирается ею не в одной точке (фокусе), а на некотором участке; величина сферической абберации зависит от кривизны поверхностей линзы и показателя преломления материала, из которого она изготовлена; вследствие сферической абберации светящаяся точка дает на экране изображение в виде кружка рассеивания, освещенного неравномерно; отличительной особенностью сферической абберации является то, что она сохраняется даже при положении светящейся точки на оптической оси, когда все остальные абберации (для монохроматического пучка) исчезают;

х р о м а т и ч е с к а я абберация - искажение, в силу которого даже для паракиальных лучей монохроматический пучок имеет целую совокупность фокусов; в связи с этим светящаяся точка на оси изображается в виде кружка, образованного (для видимого участка спектра) цветными кольцами;

а с т и г м а т и з м, заключающийся в том, что пучок лучей, исходящий из точки и составляющий некоторый угол с осью оптической системы, может терять гомоцентричность, т.е. после прохождения через фокусирующую систему не сходится в одну точку; светящаяся точка изображается пятном рассеяния, форма которого зависит от положения экрана;

к о м а - искажение, из-за которого светящаяся точка, находящаяся не на оси системы и посылающая широкий пучок лучей, дает изображение на экране в виде неравномерно освещенного пятна, напоминающего комету;

и с к р и в л е н и е плоскости изображения, когда изображение представляет собой не плоскость, перпендикулярную оптической оси, а изогнутую поверхность.

Для расчета радиуса  $\varrho$  пятна рассеяния простейших фокусирующих систем служат следующие формулы:

сферическая абберация

$$\varrho = \frac{f}{8} k_1 \left( \frac{D_{об}}{f_{об}} \right)^2;$$

хроматическая абберация

$$\varrho = k_2 (D_{об} / f_{об});$$

астигматизм

$$\varrho = k_3 (D_{об} / f_{об}) \beta^2;$$

кома

$$\varrho = \frac{f}{4} k_4 (D_{об} / f_{об})^2 \beta;$$

искривление плоскости изображения

$$\varrho = \frac{f}{4} k_5 (D_{об} / f_{об})^2 \beta^2,$$

где  $D_{об}$  и  $f_{об}$  - диаметр и фокусное расстояние объектива;  $\beta$  - угол поля зрения;  $k_i$  - коэффициент аббераций.

Теоретическим пределом диаметра пятна рассеяния является эффективный диаметр центрального пятна в дифракционной картине изображения точки, угловой размер которого, приведенный к фокусу объектива, рассчитывается по формуле

$$\Delta_{\lambda} = 2,44 \lambda / D_{об}$$

Величина  $\Delta_{\lambda}$  измеряется в радианах, а длина волны  $\lambda$  и диаметр объектива  $D_{об}$  - в одинаковых единицах.

Угловой размер  $\Delta$  изображения цели, создаваемого простейшей линзой, образованной двумя сферическими поверхностями с радиусами  $r_1$  и  $r_2$ , выражается следующей формулой:

$$\frac{\Delta}{2} = \frac{7,8 \cdot 10^{-3}}{(f_{об}/D_{об})^2} A,$$

где  $\Delta$  выражается в угловых величинах (радианах);

$$A = \frac{(n+2)\sigma^2}{n(n-1)^2} - \frac{4(n+1)\sigma}{n(n-1)} + \frac{3n+2}{n} + \frac{n^2}{(n-1)^2}; \quad \sigma = \frac{r_1+r_2}{r_2-r_1};$$

$n$  - показатель преломления материала линзы.

Множитель  $A$  зависит только от величины  $n$  и отношения  $r_1/r_2$ . Минимальное значение  $A$  и, следовательно, наименьший размер изображения цели соответствует условию

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{2n^2 + n}{2n^2 - n - 4}$$

Конденсатор хорошо работает, если лучи параллельны оптической оси или составляют с ней малый угол: при больших углах рассогласования (на краю поля зрения) часть лучей не попадает на приемник излучения, что приводит к снижению чувствительности прибора.

Для улучшения разрешающей способности простейшей зеркальной оптической системы применяют сложные первичные и вторичные зеркала и корректирующие линзы. В частности, используют зеркало, отражающий слой которого нанесен на заднюю поверхность. С помощью такого зеркала можно устранить кому, а так как сферическая aberrация только частично может быть исправлена обтекателем, то для устранения остаточной сферической aberrации необходимо применение специальной корректирующей линзы. Так, например, фокусирующая система (рис. 8, а) состоит из обтекателя, изготовленного из алюмината кальция, первичного зеркала из трехсернистого мышьяковистого стекла с задней отражающей поверхностью, обеспечивающей максимально возможную оптическую силу системы, плоского вторичного зеркала, которое, меняя направление хода лучей, уменьшает размеры системы и корректирующей линзы, изготовленной из трехсернистого мышьяковистого стекла. Разрешающая способность этой системы для пучков, наклоненных к оси под углом  $2^\circ$ , равна приблизительно 2 мрад.

Исследования зеркально-линзовых оптических систем показали, что под-

бором места расположения корректирующей линзы и выбором ее кривизны и оптической силы первичная кома и астигматизм могут быть уменьшены до нуля. В широком диапазоне изменения наложения линзы оптимальное отношение  $f_{ос}/D_{ос}$  составляет 1,25. Для получения нулевой кривизны фокальной поверхности корректирующая линза должна находиться от зеркала на расстоянии, составляющем 20% от эффективного фокусного расстояния. Это приводит к благоприятным геометрическим соотношениям, так как корректирующая линза помещается вблизи фокальной плоскости.

Для изготовления зеркал используются следующие материалы (табл. 9) с наружным покрытием: серебро, золото, медь и алюминий. Средний коэффициент отражения всех металлов в диапазоне 1...10 мкм лежит в пределах 0,95...0,98 и мало зависит от длины волны. Наиболее часто применяют алюминий высокой чистоты, осаждаемый в вакууме. По сравнению с другими металлами, имеющими высокий коэффициент отражения, алюминий легко испаряется и обладает лучшей адгезией к стеклу и пластмассам.

Минимальный угловой размер  $\Delta$  пятна остаточных aberrаций, образуемого на оси сферическим зеркалом, выражается формулой

$$\frac{\Delta}{2} \approx 7,8 \cdot 10^{-2} (f_{ос}/D_{ос})^{-3} \text{ рад}$$

или (в угловых секундах)  $\Delta \approx 1600 (f_{ос}/D_{ос})^{-3}$ .

## 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКИ И КОНТРОЛЬНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

При выборе варианта технологической оснастки и контрольных приспособлений необходимо провести патентный анализ затрат на реализацию технологического процесса в установленный промежуток времени при заданном качестве изделий. Необходимо учесть высокие требования к точности позиционирования относительно траектории движения луча (при сварке встык  $\delta \leq 0,1s$ , где  $s$  - толщина материала), удобство размещения, надежность закрепления (исключение перемещений за счет механических и термических воздействий) и быстрый съем заготовки в процессе ее обработки. Используется один из следующих вариантов унифицированной оснастки и контрольных приспособлений: неразборно-специальные, универсально-наладочные, универсально-сборочные, сборочно-разборные и специализированные наладочные их представители. В процессе их проработки выявляются технические решения, представляющие интерес по теме курсовой работы. Анализ выявленных аналогов по совокупности полезных свойств позволяет оценить технико-эконо-

Т а б л и ц а 9

Основные данные оптических материалов, применяемых для изготовления объективов и конденсаторов инфракрасных приборов

Наименование материала и формула	Длинноволновая граница пропускания, мкм	Средний коэффициент преломления	Средний показатель преломления	Растворимость в холодной воде, г/100 мм	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Температура плавления или размягчения, °С	Максимальный размер объектива, мм	Характерные особенности материала
KRS-5 (система TlBr + TlCl)	38	0,70	2,69	0,02	—	420	150...200	Красные кубические кристаллы. Не раскалывается. Трудно полируется. Обладает большим коэффициентом теплового расширения. Токсичен
KRS-6 (система TlBr + TlCl)	23	0,72	2,35	0,1... 0,3	7,19	423,5	200	Бесцветные кубические кристаллы. Токсичен
Трехсернистый мышьяк As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	12...15	0,75	2,5	0,000	3,20	196	не ограничен	Однороден. Красноватого цвета. Устойчив. Не токсичен. Размягчается при 195°С. Не подвержен коррозии
Германий Ge	>15	0,5... 0,95	4,05	0,000	5,32	958	150	Кубические кристаллы. Обрабатывается как стекло. В интервале 15...40 мкм имеет несколько максимумов и минимумов в характеристике пропускания

мические преимущества разрабатываемого объекта. В отличие от механических операций технологическая оснастка и контрольные приспособления не должны допускать прямое лазерное облучение оператора, поскольку его воздействие на клетки ткани и органы живого организма приводит к чисто химическим и биологическим изменениям с различными патофизиологическими эффектами. Максимально допустимый уровень плотности потока мощности  $[q]$  составляет  $< 1 \text{ Вт/см}^2$  при  $T < 5 \text{ с}$ . Рекомендуется оператору в очках, маске-шапочке и халате на расстоянии 0,5 м от объекта облучения с лазером в импульсе энергии  $E = 100 \text{ Дж}$  работать не более 4 часов в смену. Патентные исследования оформляются в виде пояснительной записки, входящей отдельной главой в описание курсовой работы.

Расчет напряжений (на срез и смятие) после приложения рабочей нагрузки в основных узлах технологической оснастки и контрольного приспособления проводят с учетом зазоров, усилия затяжки болтов для обеспечения достаточной силы трения между стянутыми деталями. Допускаемые напряжения определяются дифференцированным запасом прочности как произведение ряда частных коэффициентов, учитывающих надежность материала, степень ответственности детали, точность расчетных формул, действующие силы и другие факторы, определяющие условия работы конструкции. При закреплении рычага на валу клеммовым соединением необходимо определение силы трения от нормального давления на ступицу, созданного затяжкой болтов, с выполнением условия превышения величины момента трения над значением внешнего момента. Существенное снижение массы вала и повышение его жесткости обеспечивается при той же прочности применением полых валов, так как внутренние волокна материала при кручении и изгибе мало нагружены. Рекомендуются лишь определенные сочетания полей допусков в шпоночных соединениях для ширины паза и втулки. Для термообработанных деталей возможны предельные отклонения размеров ширины паза вала III, если это не влияет на работоспособность соединения. В ответственных шпоночных соединениях сопряжение дна паза с боковыми сторонами выполняется по радиусу, величина и предельное отклонение которого должны указываться на рабочем чертеже. Допускается в обоснованных случаях (пустотелые и ступенчатые валы, передачи пониженных крутящих моментов и т.п.) применять меньшие размеры сечений стандартных шпонок на валах больших диаметров за исключением выходных концов валов.

Использование стандартных и нормализованных деталей (рукояток, ручек фиксаторов, кнопок, маховичков, штурвальных гаек и пр.) осуществляется с обеспечением их прочности, допустимого радиального и торцевого биения и коррозионной стойкости. По соглашению с потребителем рабочие поверхности хромируются, а остальные грунтуются и подвергаются при мон-

таже окрашиванию под цвет изделия. Запорные пружинные и упорные наружные кольца изготавливаются штамповкой, навивкой из стальной плоской ленты. В целях предохранения их установочных винтов от вывинчивания они должны быть обвязаны проволокой (узел проволоки закладывается в специально просверленное отверстие). Винтовые цилиндрические пружины сжатия и растяжения в обычных условиях имеют допустимые значения выносливости и стойкости, зависящие от величины касательных и контактных напряжений, от соударения витков, вызванных движущимися по инерции, сопрягаемыми с пружиной деталями. Методика расчета подшипников скольжения, муфт, зубчатых, червячных, винтовых, храповых, ременных, цепных передач подробно приводится в работе [8].

При выборе материалов необходимо учитывать их свойства, условия эксплуатации изделий. Так, при изготовлении технологической оснастки и контрольных приспособлений необходимо шире использовать стали: углеродистую обыкновенного качества Ст 3 (не требуется большая прочность), автоматную А12 (хорошая механическая обработка без склонности к хрупкости), углеродистые конструкционные марок Ст.10, Ст.3, Ст.5, Ст.6, 15, 35, 45, 50Г (применяются в сварных конструкциях) и легированные стали, сварка которых несколько затруднена из-за склонности к закалке околошовной зоны и образования хрупких структур. При повышенной прочности, вязкости и сопротивляемости изнашиванию применяют относительно дешевые марганцевистые стали в состоянии проката или после нормализации. Более высоким комплексом механических свойств, чем углеродистые, обладают легированные термически обработанные стали. Стали, содержащие никель, молибден и вольфрам, следует применять, если их нельзя заменить сталями, содержащими кремний, марганец и хром. В конструкциях для подшипниковых втулок, вкладышей, червячных колес при термически обработанных червяках применяют бронзу с высокими механическими и антифрикционными свойствами. Для изготовления станин, направляющих плит, муфт, кулачков, гидроцилиндров используют отливки из высокопрочного чугуна СЧ15, СЧ25, СЧ20 и др. С целью снижения весовых характеристик узлов механизмов следует применять литейные алюминиевые сплавы АЛ2 (ответственные литые изделия), АЛ3 (детали малой и средней нагруженности типа корпусов и арматуры приборов), АЛ4 (отливки изделий крупной и средней сложности). К тому же следует отнести полуфабрикаты в виде лент, прутков, профилей и листов из нагартованных А7, А6, АДО, АД1, термически упрочняемых (подвергаются сварке) АМГ2, АМГ5, АМГ6 и термически упрочняемых с последующим старением Д1, Д16, В95 сплавов.

На заключительном этапе проектирования технологической оснастки и контрольных приспособлений проводится расчет точности позиционирования

заготовки при ее закреплении и погрешности измерения требуемых геометрических параметров. Их значения рассчитываются путем отыскания упругих перемещений, свободных зазоров, величин биений вращающихся элементов конструкций, характерных рабочему состоянию устройств.

## 6. ТРЕБОВАНИЯ К ЧЕРТЕЖАМ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКИ И КОНТРОЛЬНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Общие требования к содержанию нормоконтроля изложены в работе [7]. В конструкторской документации должны быть отражены: соответствие обозначения, присвоенного чертежу, с правильным выполнением основной надписи; соответствие требованиям ЕСКД на форматы, масштабы, изображения - виды, разрезы, сечения; правильное нанесение размеров и отклонений, обозначение материала, термообработки, покрытия, условное изображение конструктивных элементов резьб, шлицевых и зубчатых соединений, а также правильность нанесения технических требований с последовательностью их изложения. В комплект чертежей должны входить (по указанию руководителя) сборочные чертежи и чертежи основных сборочных единиц и деталей, чертежи оборудования, приборов, электрических, пневматических и гидравлических схем.

## 7. ТРЕБОВАНИЯ К ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКЕ

Пояснительная записка к курсовой работе должна содержать следующие разделы и документы: титульный лист; техническое задание; аннотация (реферат); перечень графических работ; содержание; введение; основная часть (включается патентное исследование); заключение; список использованных источников; приложение (при необходимости). Оформление пояснительной записки должно соответствовать РД СГАУ I44-I-87 "Требования к оформлению учебных тестовых документов. Методические указания".

## Библиографический список

1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 302 с.
2. Лазерная электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин и др. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
3. Мордасов В.И. Проектирование лазерной технологии в авиастроении: Учеб. пособие / Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 109 с.
4. Мордасов В.И. Проектирование лазерной технологии в авиастроении: Учеб. пособие / Самар. авиац. ин-т. Самара, 1991. 252 с.

5. Проектирование лазерных систем авиационного и космического назначения: Учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1 /В.И.Мордасов, В.Н.Гришанов. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1995. 121 с.

6. Проектирование лазерных систем авиационного и космического назначения: Учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 2 /В.И.Мордасов, В.Н.Гришанов. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1995. 171 с.

7. Сборник нормативно-технических документов (требования по стандартизации при проведении учебного процесса). В 3 ч. Ч. 3 /А.А.Ткаченко /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1990. 69 с.

8. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т. 2 /В.И.Анурьев. М.: Машиностроение, 1992. 784 с.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

1. Техническое задание на курсовую работу .....	3
2. Объем и содержание курсовой работы .....	4
3. Рекомендации по проектированию и расчету технологических процессов лазерной обработки .....	4
3.1. Описание оптической системы .....	5
3.2. Проведение тепловых испытаний конструкцион- ных материалов .....	7
3.3. Спекание покрытий .....	II
4. Рекомендации по конструированию и расчету элементов оптических систем .....	II
5. Рекомендации по проектированию технологической оснастки и контрольных приспособлений .....	26
6. Требования к чертежам оптических систем, технологической оснастки и контрольных приспособ- лений .....	30
7. Требования к пояснительной записке .....	30
Библиографический список .....	30

Учебное издание

ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Составитель Мордасов Василий Иванович

Редактор Т.И. Кузнецова

Техн. редактор Г.А. Усачева

Корректор Т.И. Щелокова

Подписано в печать 3.10.97. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага газетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,86. Усл. кр.-отт. 1,98. Уч.-изд. л. 2,0.

Тираж 100 экз. Заказ 188. Арт. С-28мр/97.

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

---

ИПО Самарского государственного аэрокосмического  
университета. 443001 Самара, ул. Молодогвардейская, 151.