

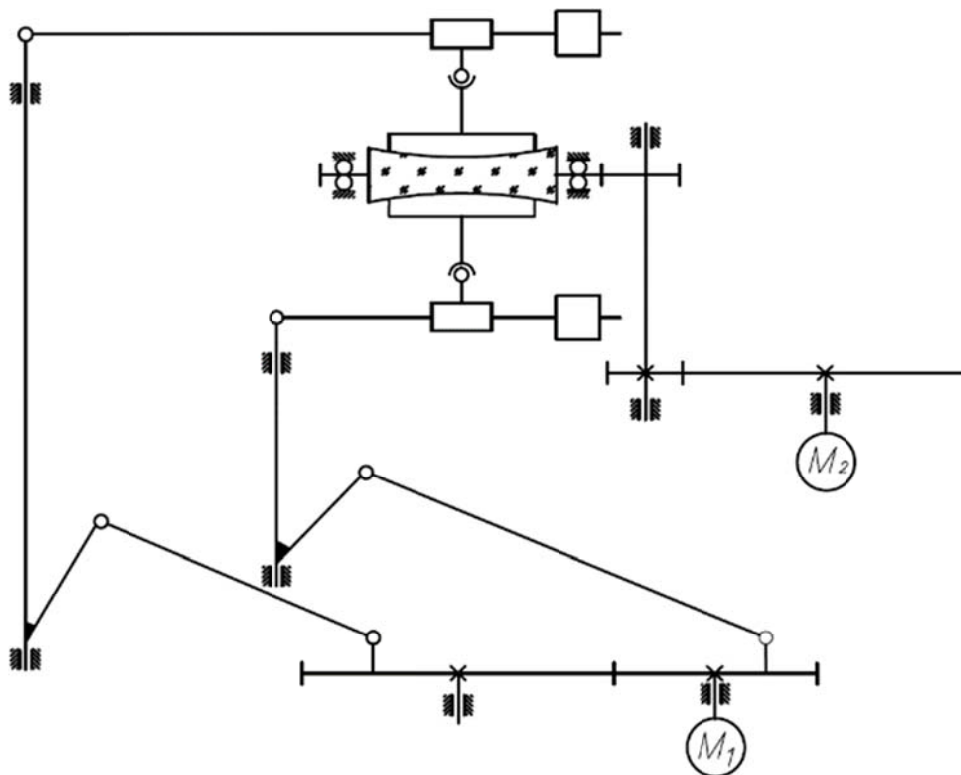


Министерство образования
Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Лазерная техника и технология»

А.С. Козерук

ТЕХНОЛОГИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ



Минск
БНТУ
2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Лазерная техника и технология»

А.С. Козерук

ТЕХНОЛОГИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия для студентов учреждений высшего образования
по специальностям «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы»,
«Механические и электромеханические приборы и аппараты»*

Минск
БНТУ
2016

УДК 681.7.02(075.8)

ББК 34.96я7

К59

Рецензенты:

кафедра технологии стекла и керамики Белорусского государственного технологического университета (зав. кафедрой – доктор технических наук, профессор *И. А. Левицкий*);

кандидат технических наук, доцент, директор ОАО «Оптическое станкостроение и вакуумная техника» *В. С. Томаль*

Козерук, А. С.

К59 Технология оптического приборостроения: учебное пособие для студентов специальностей 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы» и 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты» / А. С. Козерук. – Минск : БНТУ, 2016. – 504 с.
ISBN 978-985-550-739-1.

Приведены современные методы получения деталей из основных конструкционных материалов оптического приборостроения: стекла, металлов и пластмасс.

Рассмотрены теоретические основы и методы их практической реализации при нанесении покрытий на оптические детали и получении фотошаблонов.

Изложена последовательность операций сборки, юстировки и испытания линзовых, зеркально-призмных и оптико-электронных узлов и приборов в целом и проанализирована особенность конструкции применяемых при этом контрольно-юстировочных и измерительных приборов.

Описаны наиболее часто применяемые приемы ремонта приборов и используемый при этом инструмент и приспособления.

УДК 681.7.02(075.8)

ББК 34.96я7

ISBN 978-985-550-739-1

© Козерук А. С., 2016

© Белорусский национальный
технический университет, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	12
----------------	----

Раздел 1

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Глава 1. АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	14
1.1. Шлифующие абразивы естественного и искусственного происхождения....	14
1.2. Зернистость и зерновой состав абразивов.....	15
1.3. Регенерация абразивов	17
1.4. Полирующие абразивы.....	17
Глава 2. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	19
2.1. Смазочно-охлаждающие жидкости	19
2.2. Материалы для блокирования	20
2.3. Материалы для изготовления полировальников	21
2.4. Материалы для защитных покрытий и оптические клеи.....	22
Глава 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ШЛИФОВАНИЯ И ПОЛИРОВАНИЯ СТЕКЛА ..	24
3.1. Действие абразивных зерен на стекло в процессе шлифования.....	24
3.2. Влияние основных технологических факторов на процесс шлифования.....	25
3.3. Обработка стекла связанным шлифующим абразивом	27
3.4. Сущность процесса полирования стекла.....	29
3.5. Влияние основных технологических факторов на производительность процесса полирования	30
Глава 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ.....	33
4.1. Основные сведения о кинематике станков для обработки оптических деталей.....	33
4.2. Влияние относительной линейной скорости при обработке плоскостей.....	35
4.3. Влияние давления при обработке плоскости	39
4.4. Влияние неравномерного измельчения абразивных зерен и корректировки поверхности инструмента	39
4.5. Влияние факторов настройки станка.....	40
Глава 5. ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКИМ ДЕТАЛЯМ И МЕТОДЫ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ	42
5.1. Чертежи оптических деталей.....	42
5.2. Показатели качества деталей.....	43
5.3. Виды операций обработки стекла	46
5.4. Общие сведения о типах производства и технологическом процессе	46
5.5. Технологическая документация	47

Глава 6. БЛОКИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ	48
6.1. Требования к блокировке оптических деталей и к наклейным веществам	48
6.2. Склеивание и блокировка заготовок при предварительной обработке.....	50
6.3. Способ эластичной блокировки линз	50
6.4. Способ жесткой блокировки линз.....	52
6.5. Блокировка призм твердеющим раствором	53
6.6. Блокировка высокоточных деталей	54
6.7. Блокировка призм и пластин оптическим контактом	54
6.8. Блокировка детали действием сил капиллярного натяжения жидкости.....	56
Глава 7. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ. АЛМАЗНЫЙ ИНСТРУМЕНТ	56
7.1. Резание стекла	56
7.2. Раскалывание, распиливание и кругление стекла	57
7.3. Сверление и высверливание стекла	58
7.4. Алмазные абразивные круги.....	59
7.5. Типовые формы алмазно-абразивных кругов и их выбор.....	61
7.6. Расчет алмазного абразивного инструмента на металлической связке	63
7.7. Изготовление алмазного абразивного инструмента.....	64
Глава 8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ	66
8.1. Станки для тонкого алмазного шлифования и полирования	66
8.2. Особенности точного формообразования плоских и сферических поверхностей алмазным инструментом	68
8.3. Станки для шлифования и полирования свободным абразивом и полирующей суспензией.....	72
Глава 9. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ	73
9.1. Обработка по методу свободного притирания	73
9.2. Обработка по методу «Синхроспид»	80
9.3. Магнитореологическое полирование оптических деталей.....	84
Глава 10. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ	87
10.1. Проектирование технологических процессов.....	87
10.2. Технология изготовления плоскопараллельных пластин и клиньев	88
10.3. Технология изготовления призм	98
10.4. Технология изготовления линз.....	107
10.5. Контроль линз	113
10.6. Соединение оптических деталей.....	120
10.7. Изготовление пробных стекол.....	123

Глава 11. ИЗГОТОВЛЕНИЕ АСФЕРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ...	125
11.1. Параметры асферических деталей	125
11.2. Правила выполнения чертежей оптических деталей с асферическими поверхностями	127
11.3. Способы формообразования асферических оптических деталей	128
11.4. Контроль асферических поверхностей	131
Глава 12. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ШКАЛ И СЕТОК	136
12.1. Общие сведения о шкалах и сетках	136
12.2. Механические методы изготовления шкал	137
12.3. Фотолитографический метод изготовления сеток	145
12.4. Изготовление фотошаблонов.....	151
12.5. Основное технологическое оборудование для получения фотошаблонов	157
Глава 13. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ШАРОВИДНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТЕКЛА	160
13.1. Предварительная обработка шариков по классической технологии.....	160
13.2. Метод пневмоцентробежной обработки шариков.....	162
13.3. Модернизированное устройство для пневмоцентробежной обработки шариков	163
13.4. Устройство для формообразования шаровидных деталей широкого диапазона диаметров	165
13.5. Классические методы шлифования и полирования стеклянных шариков	167
13.6. Перспективный метод финишной обработки стеклянных шариков	168
13.7. Центрирование микролинз.....	170
Глава 14. ОБРАБОТКА КРИСТАЛЛОВ	171
14.1. Технологические свойства кристаллов.....	171
14.2. Механическая обработка кристаллов	172
14.3. Изготовление оптических деталей из некоторых кристаллов.....	175
Глава 15. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СТЕКЛОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ	178
15.1. Характеристика деталей.....	178
15.2. Конструкция стеклометаллических зеркал	178
15.3. Материалы для стеклометаллических зеркал и физическая сущность процесса спекания	179
15.4. Технология изготовления стеклометаллических зеркал.....	180
Литература к разделу 1	181

Раздел 2

НАНЕСЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ

Глава 16. ФОРМИРОВАНИЕ И СТРУКТУРА ТОНКИХ ПЛЕНОК.....	185
16.1. Общие положения.....	185
16.2. Металлические покрытия.....	186

16.3. Эпитаксиальные пленки	191
16.4. Процессы старения	194
16.5. Образование пор в конденсированных пленках	196
16.6. Напряжения в пленках.....	203
16.7. Измерение механических свойств покрытий.....	206
Глава 17. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ.....	210
17.1. Металлические покрытия.....	210
17.2. Неметаллические покрытия.....	213
Глава 18. ВАКУУМНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ.....	218
18.1. Сущность метода	218
18.2. Подготовка подложек к нанесению покрытий	219
18.3. Формирование покрытия	221
18.4. Испарение материалов	222
18.5. Перенос вещества от испарителя к подложке.....	222
18.6. Способы получения однородных по толщине покрытий	224
18.7. Специальные методы получения однородных по толщине покрытий	231
18.8. Электронно-лучевой нагрев.....	236
18.9. Лазерный нагрев	238
Глава 19. ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ.....	240
19.1. Сущность ионно-плазменного нанесения покрытий	240
19.2. Взаимодействие энергетических ионов с материалом.....	242
19.3. Формирование покрытий в процессе ионно-плазменного и ионно-лучевого нанесения.....	245
Литература к разделу 2.....	248

Раздел 3

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Глава 20. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕТАЛЛА И ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ИХ КОНСТРУКЦИИ	250
20.1. Структура технологического процесса изготовления деталей	250
20.2. Свойства технологических процессов	250
20.3. Технологическая подготовка производства	251
20.4. Виды технологичности.....	251
20.5. Стадии технологичности.....	252
20.6. Общие требования к технологичности конструкции деталей.....	252
20.7. Общие требования к технологичности конструкции деталей при механической обработке.....	254
20.8. Технологические требования к элементарным поверхностям деталей приборов	254

20.9. Общие требования к технологичности конструкции при термической обработке.....	260
20.10. Технологические особенности конструирования деталей из пластмасс и металлокерамики.....	260
Глава 21. ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ДАВЛЕНИЕМ	261
21.1. Особенности процесса механической штамповки и конструкция штампов.....	261
21.2. Высокоэнергетические методы штамповки.....	263
21.3. Прессование и конструкция пресс-форм.....	264
Глава 22. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ. ЭЛЕМЕНТЫ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ	266
22.1. Отделочные методы обработки.....	266
22.2. Движение рабочих узлов станка и элементы режима резания.....	267
22.3. Типы приводов и передач станков.....	269
22.4. Классы и конструктивные элементы инструментов	270
22.5. Инструментальные материалы	271
22.6. Классификация инструментов.....	272
Глава 23. ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ	274
23.1. Общая характеристика материалов.....	274
23.2. Свойства металлов.....	274
23.3. Общие понятия о процессе резания.....	275
23.4. Процесс образования стружки и ее типы	276
23.5. Образование нароста при резании	277
23.6. Вибрации при резании материалов.....	278
Глава 24. ТОЧЕНИЕ И ФРЕЗЕРОВАНИЕ	279
24.1. Классификация резцов общего назначения	279
24.2. Общие сведения о токарных станках.....	280
24.3. Обработка эксцентриковых деталей	281
24.4. Общие сведения о процессе фрезерования	282
Глава 25. СВЕРЛЕНИЕ И РАЗВЕРТЫВАНИЕ	283
25.1. Устройства для крепления осевых инструментов	283
25.2. Типы, геометрические параметры и конструктивные элементы сверл	285
25.3. Конструкции разверток	286
25.4. Инструментальная оснастка для станков с числовым программным управлением и автоматических линий	287
Глава 26. ПРОТЯГИВАНИЕ, ПРОШИВАНИЕ, СТРОГАНИЕ И ДОЛБЛЕНИЕ. РЕЗЬБООБРАЗОВАНИЕ И АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА.....	289
26.1. Обработка протягиванием и прошиванием.....	289

26.2. Особенности обработки строганием и долблением	290
26.3. Способы получения резьб и применяемые инструменты.....	292
26.4. Абразивная обработка	293
Глава 27. ОБРАБОТКА ПЛАСТМАСС РЕЗАНИЕМ	295
27.1. Физические основы резания пластмасс	295
27.2. Обработка пластмасс резанием лезвийным инструментом.....	295
Глава 28. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ	298
28.1. Электроэрозионная обработка.....	298
28.2. Ультразвуковая обработка	299
28.3. Электрохимическая и электронно-лучевая обработка. Обработка излучением лазера	300
28.4. Плазменная обработка.....	302
28.5. Магнитно-абразивная обработка.....	303
28.6. Технология быстрого прототипирования.....	305
Глава 29. ИЗГОТОВЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ДЕТАЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ.....	307
29.1. Изготовление корпусных деталей	307
29.2. Контроль корпусных деталей	310
29.3. Изготовление оправ, колец и тубусов.....	315
29.4. Обработка окулярной резьбы	321
29.5. Особенности обработки корпусов труб.....	323
29.6. Контроль оправ и тубусов.....	324
29.7. Изготовление зубчатых колес и реек.....	327
Литература к разделу 3.....	331

Раздел 4

СБОРКА И ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Глава 30. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ	332
30.1. Особенности оптических приборов	332
30.2. Основные понятия и определения.....	333
30.3. Структура технологического процесса сборки.....	333
30.4. Исходные данные, необходимые для проектирования процесса сборки... 334	
30.5. Общие требования технологии сборки к конструкции.....	335
30.6. Технологическая документация процесса сборки.....	335
30.7. Разработка схем сборки.....	336
30.8. Проектирование операционной технологии	337
30.9. Экономическая оценка технологических процессов	340
30.10. Типизация технологических процессов	340
30.11. Технологичность и серийнопригодность	341

30.12. Проектирование сборочных приспособлений	343
Глава 31. ТИПОВЫЕ РАБОТЫ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ ПРИ СБОРКЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ	344
31.1. Промывка механических деталей	344
31.2. Чистка оптических деталей.....	344
31.3. Выполнение разъемных и неразъемных соединений.....	345
31.4. Виды пригоночных работ и их выполнение	348
31.5. Смазка оптических приборов	349
31.6. Герметизация оптических приборов.....	349
Глава 32. СБОРКА И РЕГУЛИРОВКА ТИПОВЫХ УЗЛОВ ПРИБОРОВ	350
32.1. Сборка и контроль направляющих	350
32.2. Уравновешивание подвижных частей приборов.....	354
32.3. Сборка оптических деталей с механическими.....	356
32.4. Сборка и юстировка объективов	358
32.5. Сборка и юстировка окуляров.....	361
32.6. Сборка и юстировка систем переменного увеличения	362
32.7. Сборка и юстировка осветительных систем	364
Глава 33. КОНТРОЛЬНО-ЮСТИРОВОЧНЫЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ.....	364
33.1. Коллиматоры. Устройство и назначение.....	364
33.2. Установка коллиматора на бесконечность.....	365
33.3. Центрирование коллиматора	368
33.4. Широкоугольный коллиматор.....	370
33.5. Автоколлиматоры	371
33.6. Динаметры	373
33.7. Трубка Юдина, окуляр-микрометр и объект-микрометр	374
Глава 34. ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И МЕТОДЫ ИХ КОНТРОЛЯ	375
34.1. Разрешающая способность фотографического объектива	375
34.2. Разрешающая способность микрообъектива	378
34.3. Качество изображения оптических систем и его контроль.....	379
34.4. Определение фотометрических характеристик оптических приборов.....	381
34.5. Измерение цветности объективов	383
34.6. Измерение угла поля зрения	385
34.7. Контроль и юстировка визирной линии в телескопических системах.....	386
34.8. Параллакс в оптических приборах.....	389
Глава 35. ОСНОВНЫЕ ЮСТИРОВОЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ.....	392
35.1. Операции и приемы юстировки	392
35.2. Стадии и задачи юстировки и методы их аналитического решения.....	392
35.3. Фокусировка изображения.....	393

35.4. Юстировка увеличения зрительной трубы	400
35.5. Регулировка увеличения в микроскопах	401
Глава 36. ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ	402
36.1. Юстировка поворота изображения и разворота сетки в телескопических приборах.....	402
36.2. Юстировка микроскопов.....	403
36.3. Юстировка угломерных приборов	404
36.4. Юстировка зрительной трубы с двумя сетками	409
36.5. Юстировка автоколлимационной установки А. Н. Захарьевского.....	410
Глава 37. ЮСТИРОВКА ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ.....	411
37.1. Особенности приборов ночного видения.....	411
37.2. Сборка и контроль приборов	413
37.3. Цоколевка и проверка электронно-оптического преобразователя	415
37.4. Согласование визирной оси прибора ночного видения с его посадочным местом и направлением светового пучка прожектора.....	416
Глава 38. ИСПЫТАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ.....	418
38.1. Классификация испытаний и способов их проведения	418
38.2. Механические испытания	421
38.3. Климатические испытания.....	425
38.4. Биологические и космические испытания	432
Литература к разделу 4.....	435

Раздел 5

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Глава 39. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИБОРОВ	437
39.1. Общие сведения	437
39.2. Техническое обслуживание	437
39.3. Периодичность поверки	438
39.4. Транспортирование.....	438
39.5. Хранение.....	439
39.6. Категорирование и списание	440
Глава 40. ОПЫТНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПРИБОРОВ	441
40.1. Общие сведения	441
40.2. Планирование опытной эксплуатации.....	442
40.3. Проведение опытной эксплуатации.....	443
40.4. Анализ результатов.....	444
Глава 41. ДИАГНОСТИКА ПРИБОРОВ.....	444
41.1. Задачи диагностики	444
41.2. Диагностические признаки	445

41.3. Анализ диагностического сигнала	446
41.4. Диагностирование сложных приборов	447
Глава 42. РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ ПРИБОРОВ	449
42.1. Общие сведения о ремонтпригодности приборов	449
42.2. Факторы, определяющие ремонтпригодность приборов.....	450
42.3. Критерии ремонтпригодности	450
42.4. Меры обеспечения ремонтпригодности	452
42.5. Системы контроля и отыскания неисправностей	453
42.6. Общий порядок поиска неисправностей	453
42.7. Методы поиска отказавших элементов	455
42.8. Обеспечение приборов запасными частями.....	458
42.9. Ремонтосложность прибора	459
Глава 43. ДЕФЕКТАЦИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ	460
43.1. Методы дефектации.....	460
43.2. Измерения при дефектации	461
43.3. Дефектация деталей.....	462
43.4. Диагностирование приборов	464
Глава 44. ОРГАНИЗАЦИЯ РЕМОНТА	465
44.1. Характер износа. Виды износа и защита от них.....	465
44.2. Основные виды работ по техническому обслуживанию и ремонту приборов.....	467
44.3. Методы планирования и организации ремонтов.....	468
44.4. Ремонтные чертежи	469
Глава 45. ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА	470
45.1. Схема технологического процесса ремонта.....	470
45.2. Инструмент и приспособления для проверки и ремонта.....	471
45.3. Общие сведения о разборке приборов.....	472
45.4. Общие сведения о технологии ремонта.....	473
45.5. Восстановление размеров детали.....	475
45.6. Восстановление чистоты поверхности детали.....	478
45.7. Нарращивание изношенных поверхностей и склеивание	480
45.8. Изменение конструкции деталей	488
45.9. Применение сварки при ремонте	489
45.10. Методы пригонки деталей	491
45.11. Упрочняющая обработка	493
45.12. Ремонт резьбовых и шпоночных соединений.....	496
45.13. Ремонт валов.....	498
45.14. Ремонт подшипников	499
Литература к разделу 5.....	503

ВВЕДЕНИЕ

Издание содержит материал по технологии обработки высокоточных оптических деталей и нанесения на их исполнительные поверхности специальных покрытий, а также шкал и сеток, методам получения деталей различной формы, степени точности и качества поверхности из металла и пластмасс, по сборке и совместной отладке (юстировке) оптических и механических узлов и приборов в целом, а также испытанию, эксплуатации и ремонту оптических приборов. Такое комплексное освещение отмеченных вопросов в их взаимосвязи отображает последовательность выполнения операций по изготовлению современных оптических приборов, начиная с заготовок из различных материалов и заканчивая готовым изделием, его испытанием, эксплуатацией и ремонтом, что повышает информативность пособия и является его отличительной особенностью в сравнении с существующими изданиями.

Наряду с традиционными методами получения элементов приборов из оптического стекла в пособии изложены перспективные приемы изготовления оптических деталей, направленные на повышение качества приборов и снижение их себестоимости. Сюда можно отнести одновременное двустороннее формообразование маложестких линз с тонким центром; пневмоцентробежную обработку стеклянных шариков для микрооптики, обеспечивающую самоорганизацию процесса получения шара из куба и позволяющую существенно повысить выход годных деталей; центрирование микролинз, при использовании которого не задействуются дорогостоящие станки-полуавтоматы модели ЦС и реализуется операция группового совмещения оптической и геометрической осей детали.

В разделе, посвященном получению механических деталей, кроме классической технологии резания металла излагаются эффективные физико-химические методы обработки, а именно: высокоэнергетическая штамповка, электроэрозионная, ультразвуковая, электрохимическая, магнитно-абразивная, плазменная и электронно-лучевая обработка, а также обработка лучом лазера и технология быстрого прототипирования (последовательного изготовления трехмерных объектов). Последняя является прогрессивным приемом изготовления различных макетов (прототипов), инструмента (технологической оснастки) для традиционных производственных процессов (литья, штамповки) либо промежуточных средств для его производства и непосредственного изготовления деталей.

При рассмотрении вопросов непосредственного изготовления оптических приборов как готовых изделий особое внимание уделяется способам сборки и юстировки типовых узлов приборов, а также самих приборов различного назначения, в том числе для работы в условиях ограниченной видимости. Помимо этого даются описания наиболее распространенных вспомогательных операций сборочного процесса.

Изложены сведения по методике эксплуатации приборов и технологии их ремонта, которая предусматривает восстановление размеров и чистоты механических элементов, наращивание изношенных поверхностей, пригонку деталей и упрочняющую обработку.

По содержанию издание согласовано с программами соответствующих дисциплин для студентов, магистрантов и аспирантов приборостроительных факультетов вузов и может быть полезно не только изучающим технологию оптического приборостроения (в том числе в приборостроительных техникумах) и работающим в этой области, но и конструкторам оптических приборов, которые должны учитывать как техническое задание на изделие, так и требования технологии, т. е. прибор должен быть технологичным с точки зрения его производства, эксплуатации и ремонта.

В пособии не приводятся исчерпывающие сведения по всей совокупности порой весьма сложных технологических вопросов реального производства, многие из которых изложены в справочной литературе и в разнообразной нормативной документации (государственных и отраслевых стандартах, нормалях, инструкциях и т. п.). Дается методическое освещение основных приемов, позволяющих решать широкий спектр конкретных постоянно изменяющихся задач технологического обеспечения на всех этапах создания и эксплуатации оптических приборов.

Раздел 1

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Глава 1. АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1.1. Шлифующие абразивы естественного и искусственного происхождения

К шлифующим абразивам относятся алмаз, корунд, кварцевый песок, карбид кремния, электрокорунд, карбид бора.

Алмаз (природный и синтетический) представляет собой кристаллическую модификацию углерода. Твердость по минералогической шкале составляет 10, микротвердость – порядка 100 000 МПа. В зависимости от условий синтеза синтетического алмаза получают порошки, зерна которых отличаются размером, формой, характером поверхности, прочностью и хрупкостью. В соответствии с этим их относят к различным маркам.

Алмаз применяют в виде единичных жестко закрепленных зерен и в виде мелкой крошки-пудры, спрессованной и спеченной с металлической пудрой. В первом случае алмазом выполняют операцию резания стекла, а также гравирование штрихов на отдельных сетках; во втором – операции сверления, фрезерования и шлифования. В свободном состоянии синтетический алмаз применяют в виде паст и суспензий на завершающих стадиях обработки (полирования) некоторых кристаллов.

Корунд состоит в основном из глинозема (Al_2O_3) в количестве 70–90 % и примесей (железа, хрома, титана), которые определяют его окраску. Твердость корунда по минералогической шкале составляет 9, микротвердость – 16 000–24 000 МПа. В свободном состоянии корунд используют для шлифования практически всех оптических материалов. Имеет природное происхождение.

Карбид кремния (карборунд) – химическое соединение углерода с кремнием (SiC), получаемое при плавлении смеси угля с кварцевым песком при температуре 2000–2200 °С. Твердость карборунда по минералогической шкале составляет 9,5–9,75, микротвердость – 28 000–33 000 МПа. Применяется в виде порошка для грубого шлифования (обдирки) стекла, а также для изготовления шлифовальных кругов.

Электрокорунд Al_2O_3 представляет собой кристаллический глинозем, получаемый электроплавкой боксита при температуре 2000 °С. Благодаря высокому содержанию глинозема (до 99,5 %) электрокорунд обладает весьма высокой твердостью: по минералогической шкале – 9–9,2; микротвердость – 18 000–22 000 МПа. Применяется в виде порошков для всех видов шлифования (от грубого до самого мелкого) и изготовления шлифовальных кругов.

Сорт электрокорунда различают по цвету: наивысший сорт – белый, корунд худшего качества имеет розовый, коричневый или черный цвета.

Электрокорунд более вязок, чем карборунд, поэтому в процессе шлифования его зерна не так быстро измельчаются.

Карбид бора B_4C представляет собой соединение углерода с бором, получаемое плавлением смеси борного ангидрида и кокса при температуре $2500\text{ }^\circ\text{C}$. По твердости карбид бора близок к алмазу; его микротвердость – $33\ 350\text{--}43\ 000$ МПа. Применяется при сверлении отверстий в стекле, а также для шлифования твердых кристаллов.

1.2. Зернистость и зерновой состав абразивов

Все абразивные материалы, кроме алмаза и нитрида бора, в зависимости от способа классификации условно делятся на два класса. К первому относятся абразивные материалы, получаемые рассевом на ситах, ко второму – гидроклассификацией (зерна абразива различного размера выносятся из сосуда потоком воды, движущейся с различной скоростью). Первые делят на две группы – шлифзерно и шлифпорошки, продукты второго класса называют микропорошками. Каждая из этих групп делится на порошки разной зернистости, которым присвоены номера, соответствующие размеру зерен основной фракции (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Классификация абразивных материалов на группы

Группа абразива	Обозначение зернистости	Размер зерна основной фракции, мкм	Задерживается на сите с размером стороны ячейки в свету, мкм	Область применения	
Шлифзерно	25	315–250	250	Грубое шлифование (обдирка)	
	20	250–200	200		
	16	200–160	160		
Шлифпорошки	12	160–125	125	$Rz \approx 80\text{--}16$ мкм	
	10	125–100	100		
	8	100–80	80		
	Микропорошки	6	80–63	63	Среднее шлифование $Rz \approx 16\text{--}1,0$ мкм
		5	63–50	50	
		4	50–40	40	
			40–28	28	
Микропорошки	M63	63–50		Мелкое шлифование $Ra \approx 1,0\text{--}0,04$ мкм	
	M40	40–28			
	M28	28–20			
	M20	20–14			
	M14	14–10			
	M10	10–7			
	M7	7–5			
M5	5–3				

Для первых двух групп абразивных материалов характеристикой крупности являются размеры ячеек двух смежных сит, из которых на одном сите зерно основной фракции задерживается, а через второе сито зерно должно проходить.

Абразивные порошки одной и той же зернистости выпускают с различным содержанием основной фракции. В зависимости от этого в обозначение порошка после номера вводят одну из букв: В, П, Н, Д. Буква В характеризует порошок с наибольшим содержанием основной фракции, буква Д – с наименьшим. В зерновой состав порошков кроме основной входят побочные фракции: предельная, крупная, мелкая. Роль каждой фракции в процессе шлифования следующая:

мелкая не оказывает влияния ни на интенсивность шлифования, ни на шероховатость шлифуемой поверхности;

основная определяет интенсивность износа (ее количество должно составлять 30–40 % – по числу зерен);

крупная определяет шероховатость шлифуемой поверхности;

предельной фракции в порошке должно быть не более 0,2 %, что не увеличивает шероховатость шлифованной поверхности.

Качество абразивных порошков оценивают по их шлифующей способности и шероховатости обработанной поверхности. Шлифующую способность характеризуют массой материала, отшлифованного с образца стекла в стандартных условиях испытания.

П о р о ш к и природного и синтетического алмазов разделены на две группы: шлифпорошки и микропорошки. Шлифпорошки природного алмаза имеют одну марку – А, синтетического – пять марок: АСО, АСП, АСВ, АСК, АСС (АС – алмаз синтетический; О, Р, В, К, С – индексы типов порошков, отличающихся физико-химическими свойствами).

Ш л и ф п о р о ш о к каждой марки разделен на номера зернистости. В порошок каждой зернистости входят три фракции: крупная, основная и мелкая. Зернистость порошка установлена по основной фракции. Ее обозначают дробью, у которой числитель – размер (мкм) стороны ячейки верхнего сита, знаменатель – размер (мкм) стороны ячейки нижнего сита.

М и к р о п о р о ш к и природных алмазов имеют марки АМ и АН, синтетических – АСМ и АСН (М – medium – средний, Н – high – высокий). Микропорошок каждой марки разделен на номера зернистости, что осуществляется центрифугированием и осаждением в столбе жидкости. В промышленности используются микропорошки следующей зернистости: 60/40, 40/28, 28/20, 20/14, 14/10, 10/7, 7/5, 5/3, 3/2, 2/1, 1/0.

Микропорошок марки АСМ с размером зерен меньше 0,7 мкм служит исходным сырьем для изготовления с у б м и к р о п о р о ш к о в, используемых при обработке кварца, рубина, полупроводниковых кристаллов, металлов и некоторых оптических материалов. Субмикропорошки бывают следующей зернистости: АСМ 0,7/0, 0,5/0 и 0,3/0.

Детали из оптического стекла шлифуют водными суспензиями абразивных порошков. Концентрации суспензий выражают соотношением весовых количеств жидкой (вода) и твердой (абразив) фаз и условно обозначают Ж : Т. Обычно Ж : Т принимают в пределах 2–5.

1.3. Регенерация абразивов

Абразивные зерна в процессе обработки стекла разрушаются, размельчаются и загрязняются осколками разрушенного стекла, металлом шлифующего инструмента, жирами и другими органическими примесями. Однако если отработанный абразивный материал тщательно очистить от загрязнений и проклассифицировать по крупности на соответствующие фракции, то его снова можно использовать для обработки стекла.

Совокупность процессов очистки и классификации использованного абразива называют *регенерацией*.

Отходы металла и органических веществ, загрязняющие абразив, удаляют процеживанием абразива через сита и обработкой его кислотами (HCl или H₂SO₄). Значительно сложнее обстоит дело с очисткой абразива от осколков стекла. Отделить зерна от осколков стекла с помощью водной классификации невозможно, так как их плотность почти одинакова. Разрушение же стекла в воде может быть осуществлено только с помощью плавиковой кислоты. Однако вредность этой кислоты не позволяет применять ее для очистки абразивов. Шлифующая способность абразива заметно не понижается при содержании в нем сошлифованного стекла примерно до 50 %, поэтому при регенерации абразивов стекло не удаляют.

Качество регенерированных порошков определяют их шлифующей способностью и структурой поверхности обработанного стекла. Основным видом контроля порошков является определение их зернового состава.

1.4. Полирующие абразивы

Полирующие абразивы применяют для удаления следов шлифования с поверхности стекла до приобретения ею прозрачности с необходимой степенью чистоты. Полировальные материалы не должны вызывать на обрабатываемой поверхности механических повреждений (точек, царапин) и налетов, нарушающих ее прозрачность и увеличивающих светорассеивание поверхности. Полировальные порошки должны обладать:

- твердостью в пределах 5–7 единиц по шкале Мооса;
- постоянным зерновым составом (оптимальный размер зерен 0,8–1,4 мкм);
- пластинчатой формой зерен, которые при дроблении должны давать осколки остроугольной формы;
- отсутствием в порошке царапающих примесей;
- малой смачиваемостью жидкостью суспензии (для улучшения закрепляемости зерен на подложке полировальника).

Полирующие абразивы являются окислами некоторых металлов и представляют собой искусственно получаемые мелкозернистые порошки кристаллического строения.

Качество полировальных порошков определяют полирующей способностью и чистотой полирования. Полирующую способность порошка определяют по весу стекла марки К8, сполитованного с образца диаметром 75 мм в течение 30 мин в стандартных условиях. Чистоту полирования характеризуют классом чистоты отполированной поверхности детали.

Основными полирующими материалами являются крокус, полирит, окись тория, двуокись циркония, окись хрома, алмазные микропорошки.

Крокус (Fe_2O_3) – безводный мелкокристаллический оксид железа. Средний размер зерна 0,6–1,0 мкм, твердость по шкале Мооса 5,0–6,0 единиц. Используется при полировании деталей из стекла, чистота поверхности которых должна соответствовать первому классу.

Полирит состоит в основном из оксидов редкоземельных металлов, однако полирующие свойства определяет оксид церия CeO_2 . Размер зерен – до 5 мкм, твердость 6,0–7,0 единиц. Полирит является основным полирующим абразивом, который используется при изготовлении оптических деталей.

Оксид тория (ThO_2) – это порошок с кристаллами размером до 10 мкм, получаемый прокаливанием гидроокиси или органических солей тория. Имеет высокую полирующую способность, но не обеспечивает хорошей чистоты поверхности, поэтому применяется, как правило, для быстрого удаления следов шлифования.

Двуокись циркония (ZrO_2) получают термическим разложением соединений карбонатов и сульфатов. Сырьем является минерал циркон. Средний размер зерен 3,5–5 мкм. Применяется в основном для полирования стекол СТК.

Оксид хрома (Cr_2O_3) изготавливают восстановлением бихромата калия серой либо термическим разложением бихромата аммония. Зерна имеют размер 0,3–1,2 мкм, твердость близка к 9,0 единицам. Для обработки стекла полирующая способность окиси хрома недостаточна, однако этот порошок хорошо полирует кристаллы и металлы, менее твердые, чем стекло. Оксид хрома в виде паст (паста ГОИ) используется для доводочных и притирочных работ в инструментальной промышленности.

Алмазные микропорошки АСМ и АСН зернистостей 3/2–1/0 и субмикропорошки зернистостей 0,7/0–0,3/0 используют при полировании деталей из кристаллов рубина, сапфира, кремния и других особо твердых материалов и металлов. При определенных условиях, характеризующихся свойствами связки, микропорошки применяют для полирования стекла.

По полирующей способности рассмотренные порошки располагаются в следующем порядке:

Полирующий абразив	Относительная полирующая способность
Оксид хрома	0,5
Крокус	1,0
Полирит	1,5
Двуокись циркония	1,0–2,0
Оксид тория	2,2

Глава 2. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

2.1. Смазочно-охлаждающие жидкости

Процесс механической обработки оптических деталей (шлифование, кругление, полирование) сопровождается выделением тепла и продуктов обработки (шлама), что снижает производительность труда, сокращает срок службы инструмента, ухудшает качество обработанной поверхности.

Отвод тепла и продуктов обработки, а также уменьшение трения в зоне контакта инструмента и детали осуществляют применением смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ). СОЖ также участвует в разрушении стекла путем физико-химического воздействия.

При обработке оптических деталей алмазным инструментом и абразивными кругами эффективно используют СОЖ, состоящую из эмульсола, керосина осветительного и воды. Эмульсол представляет собой отходы масляного производства. Малое количество содержащихся в нем поверхностно-активных веществ и плохая растворимость в воде определяют низкие смазывающие и смачивающие свойства эмульсий. Поэтому в зоне контакта алмазных зерен со стеклом практически нет смазывающей пленки, а находится только прослойка воды. При отводе тепла она испаряется, трение пары «стекло–алмаз» происходит почти всухую, что ускоряет износ зерен.

Улучшенные смазочно-охлаждающие свойства имеют 5%-е водные эмульсии на основе эмульсола, компонентами которого являются сульфокислота (75 %), тринатрийфосфат (15 %), глицерин (10 %).

При использовании водосодержащих СОЖ и работе алмазного инструмента с малой нагрузкой наблюдается его засаливание. Причиной этого является взаимодействие частиц разрушенного стекла со связкой инструмента. Частицы стекла, выполняя защитную функцию, замедляют износ связки и удаление затупившихся зерен алмаза. Режим самозатачивания инструмента нарушается, и инструмент теряет режущую способность. Взаимодействие стекла со связкой уменьшают, вводя в состав СОЖ вещества, которые адсорбируются на связке данного состава лучше, чем стекло (часто используют кальцинированную соду).

При выполнении операции центрирования линз алмазными кругами в качестве СОЖ используют веретенное или вазелиновое масла. Для центрирования линз из неналетоопасных стекол могут быть применены водо-

содержащие эмульсии, но при этом шероховатость обработанной поверхности увеличивается.

При шлифовании оптических деталей свободным абразивом роль СОЖ выполняет сама водная абразивная суспензия, а при полировании – водная полировочная суспензия.

2.2. Материалы для блокирования

Для закрепления заготовок оптических деталей на приспособлениях при шлифовании и полировании необходимы клеочные вещества, которые обладают достаточной адгезией к материалам заготовок и приспособлений, минимально деформируют их при наклеивании, не вступают в химическое взаимодействие с материалами заготовок, приспособлений, СОЖ и абразивами, легко отстают от заготовок и приспособлений после обработки, растворяются в различных реагентах.

Наиболее широко применяют различные клеочные смолы, гипс и другие материалы, в достаточной мере удовлетворяющие перечисленным требованиям.

Клеочные смолы – это сплавы канифоли, пека, воска, парафина и шеллака, взятых в заданном соотношении для получения необходимой вязкости.

Канифоль – продукт переработки сосновой смолы (живицы). Температура размягчения 65–80 °С. Канифоль обладает высокой клеящей способностью, поэтому в количестве от 20 до 90 % входит в состав всех клеочных и полировочных смол. Смолы с большим содержанием канифоли обладают большей твердостью и более высокой температурой размягчения.

Пек древесный – продукт переработки дегтя деревьев хвойных пород. Температура размягчения 50–60 °С. Входит в состав всех смол в качестве пластификатора для придания им эластичности и понижения вязкости.

Воск пчелиный – мягкое кристаллическое вещество; температура плавления – около 65 °С. Устойчив к действию кислот, в том числе плавиковой. В количестве от 30 до 75 % входит в состав некоторых смол для увеличения их пластичности.

Парафин – продукт переработки нефти и бурого угля. Температура размягчения 38–65 °С. Применяется как составной компонент некоторых смол, однако его в большей степени используют для наклейки (склеивания) деталей на заготовительных операциях.

Шеллак (естественная смола) – продукт биологической деятельности насекомых на ветвях тропических деревьев. Температура плавления – около 90 °С. Входит в состав некоторых особо прочных смол (от 40 до 50 %). Также шеллак применяется для склеивания малогабаритных деталей на заготовительных операциях.

Все перечисленные вещества растворяются в бензине и ацетоне, а шеллак – в спирте и щелочах.

Процесс приготовления смол сводится к получению однородной массы сплавлением исходных компонентов с последующим введением наполнителей. Наполнители (мел, тальк, гипс, древесные опилки) в мелкоизмельченном просеянном виде добавляют для увеличения прочности и уменьшения усадки наклеечных смол.

Наклеечные воски – сплавы канифоли (80–90 %) и воска (20–10 %), обладающие высокой вязкостью. Толщина клеящего слоя составляет 0,2–0,3 мм. Используются для склеивания заготовок между собой и крепления их на приспособлениях при заготовительных операциях.

Наклеечные парафины – сплавы парафина (15–20 %) и воска (85–80 %), обладающие высокой пластичностью и вязкостью. Толщина клеящего слоя – 0,05–0,1 мм; используются на заготовительных операциях.

Гипс – мелкозернистый порошок. Использование гипса для крепления заготовок основано на свойстве его водных растворов через некоторый промежуток времени затвердевать и надежно удерживать заготовки силами трения и адгезии.

Сплавы металлов с низкой температурой плавления имеют некоторые преимущества перед другими наклеечными материалами:

- детали можно разблокировать погружением блока в теплую воду;
- отпадает необходимость в промывке деталей и наклеечных приспособлений в органических растворителях;
- появляется возможность многократно использовать сплав.

Примером такого сплава является сплав Вуда (50 % висмута, 25 % свинца, по 12,5 % олова и кадмия).

2.3. Материалы для изготовления полировальников

Обрабатываемые поверхности полировальников выполняют нанесением или присоединением к металлическим основам инструмента смоляных, волокнистых или синтетических подложек.

Для сохранения более стабильной формы рабочей поверхности смоляного полировальника в полировочные смолы в качестве наполнителя вводят полирит в отношении 1 : 1–1 : 2 или древесные опилки в количестве 5–10 %. Смоляные полировальники позволяют получать наиболее точные поверхности оптических деталей, но при этом необходимо использовать неинтенсивные режимы обработки.

Технические волокнистые материалы используют для изготовления так называемых суконных полировальников. Ткань на металлическую основу инструмента приклеивают смолой. Суконные полировальники допускают интенсивные процессы полирования и обеспечивают высокую оптическую чистоту обрабатываемых поверхностей, но используются для изготовления деталей с низкими требованиями к точности формы.

Синтетические вещества с микропористой структурой, например пенополиуретан, на металлическую основу инструмента наклеивают специ-

альным клеем, стойким к промывочным жидкостям и суспензиям. Достоинством таких полировальников является хорошая смачиваемость их поверхности полирующими составами (для полиуретана – окись церия), высокая износостойкость, значительное сопротивление растягивающим усилиям, теплостойкость. Эти свойства полировальников позволяют вести обработку точных оптических деталей при интенсивных режимах.

2.4. Материалы для защитных покрытий и оптические клеи

Для предохранения полированных поверхностей от механических повреждений при последующей обработке используют защитные покрытия. Они должны иметь хорошую адгезию к оптическим деталям: химически не взаимодействовать с материалом детали, смолами, абразивами и легко смываться после обработки.

В оптическом производстве используют защитные покрытия лаками и эмалями. Для защиты полированных поверхностей деталей наиболее распространена нитроэмаль НЦ-25. Эту же эмаль используют и для защиты мест соединения деталей с приспособлением при контактной блокировке. Для этих же целей применяют лак «Цапон». Поверхности гигроскопических кристаллов и химически нестойких стекол защищают лаком Ф-32Л. Вспомогательные поверхности оптических деталей для улучшения их эксплуатационных свойств (устранения бликов, уменьшения светорассеяния), а также для защиты фасок от механических поверхностей покрывают черными матовыми эмалями ХС-1107 или ПФ-163. Серебряные зеркала с внутренним отражением защищают гальваническим нанесением некоторых металлов (медь, хром, никель) с последующим покрытием бакелитовым лаком. Лаки и эмали наносятся окуном, кистью или пульверизатором.

Клеи для соединения оптических деталей друг с другом должны обладать максимальной прозрачностью, высокой оптической однородностью, близостью показателей преломления и спектральных характеристик клея и соединяемых деталей. Помимо этих качеств клей должен обладать механической прочностью, морозостойкостью, теплостойкостью и способностью не деформировать склеенные детали.

Механическая прочность. При недостаточной механической прочности склеивающего слоя деформация деталей в оправе вызывает также деформацию этого слоя, что приводит к искажению фронта световой волны и ухудшению качества изображения. Может также произойти разрушение слоя клея, т. е. возникнет расклейка.

Морозостойкость. Склеивающий слой должен выдерживать сильное охлаждение (порядка от -40 до -60 °С) без видимых разрушений. Морозостойкость склейки снижается при закреплении деталей в металлических оправках, так как у металла коэффициент расширения обычно больше, чем у стекла, и при охлаждении в клеящем слое создаются дополнительные натяжения.

Теплостойкость. Это качество клея предотвращает сдвиг соединенных деталей при температурах порядка 40–60 °С. Теплостойкость зависит в основном от температуры размягчения клея и увеличивается с уменьшением толщины его слоя. Низкая теплостойкость приводит к взаимному смещению деталей, их децентрированию и ухудшению качества изображения.

Способность не деформировать склеиваемые детали. При неравномерном затвердевании клеящего слоя в нем возникают натяжения, вызывающие деформацию внешних поверхностей склеенных деталей (особенно – отрицательных менисков) и ухудшающие качество изображения.

Для возможности расклейки блока без порчи деталей клеящий слой должен поддаваться размягчению при нагревании. Клей не должен вызывать появление налетов на поверхности стекла, быть ядовитым.

В оптической промышленности наиболее широко используются следующие клеи: бальзам, бальзамин, бальзамин-М, ОК-50П, ОК-60, ОК-72ФТ, клей УФ-235М, акриловый клей.

Бальзам – прозрачная естественная смола (живица) пихтовых деревьев. Подготовка клея заключается в растворении живицы в этиловом спирте, промывке водой, сушке, фильтровании и сгущении увариванием.

В нормальном состоянии бальзам – это твердое вещество. Жизнеспособность клея в расплавленном состоянии – не более 8 ч, в твердом состоянии – от шести месяцев и больше. Клей применяется для склеивания шкал и сеток с фотослоем. Положительным качеством бальзама является способность выдерживать большое число расплавлений без изменения свойств, отрицательным – незначительный температурный интервал (от +40 до –50 °С), невысокая влагостойкость и малая прозрачность в ультрафиолетовой области спектра.

Бальзамин – синтетическое вещество в виде прозрачной бесцветной жидкости, которое используют для склеивания оптических деталей в условиях эксплуатации, подвергающихся вибрациям, механическим нагрузкам, перепадам температур, а также деталей со светоделительными покрытиями. Рабочая температура от –60 до +60 °С.

Основные недостатки бальзамина: деформирование оптических деталей, некоторая оптическая неоднородность, существенная потеря прозрачности при нагреве выше 75 °С, а также сложность разъединения склеенных деталей. Детали приборов с повышенным требованием к качеству изображения бальзамином не склеивают.

Бальзамин-М. Характеристики клея такие же, как бальзамина, но он не деформирует оптических деталей, поэтому может применяться для изделий с повышенными требованиями к качеству изображения.

ОК-50П – синтетическое вещество в виде прозрачной жидкости слабожелтого цвета. Клей используют для соединения деталей с оптическими покрытиями, работающих во влажном тропическом климате и несущих механическую нагрузку.

ОК-60 – синтетическое вещество в виде прозрачной жидкости слабо-желтого цвета, токсичен, невлагодоек. Оптических деталей при склеивании не деформирует. Клей прозрачен в области спектра до 7,5 мкм и предназначен для соединения оптических деталей из флюорита, бромистого калия и других кристаллов, работающих в ИК-области спектра.

ОК-72ФТ. Характеристики клея близки к ОК-50. Клей не деформирует детали в пределах температурного интервала от -60 до $+80$ °С. Клеем склеивают тонкие пластины, детали с оптическими покрытиями. Им герметизируют межфасочные пространства деталей.

К недостаткам клея ОК-50П и ОК-72ФТ следует отнести токсичность, малую жизнеспособность, сложность расклеивания.

Клей УФ-235М – синтетическое бесцветное, прозрачное, студенистое вещество. Используется для соединения деталей, работающих в ультрафиолетовой области спектра.

Акриловый клей – синтетическое вещество в виде прозрачной бесцветной жидкости. Применяется для склеивания поляризационных призм из кальцита, поляроидов, светофильтров, а также для соединения стекла с металлом.

Все рассмотренные клеи устойчивы к воздействию грибков плесени, поэтому ими можно склеивать оптические детали приборов, работающих в тропиках.

Глава 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ШЛИФОВАНИЯ И ПОЛИРОВАНИЯ СТЕКЛА

3.1. Действие абразивных зерен на стекло в процессе шлифования

Моделируя работу абразивного зерна при помощи стального шарика, английский ученый Престон показал, что при давлении на неподвижный шарик в стекле образуется коническая трещина (рис. 3.1, *а*), а при перекачивании шарика – сеть трещин, образующих *поврежденный* слой стекла.

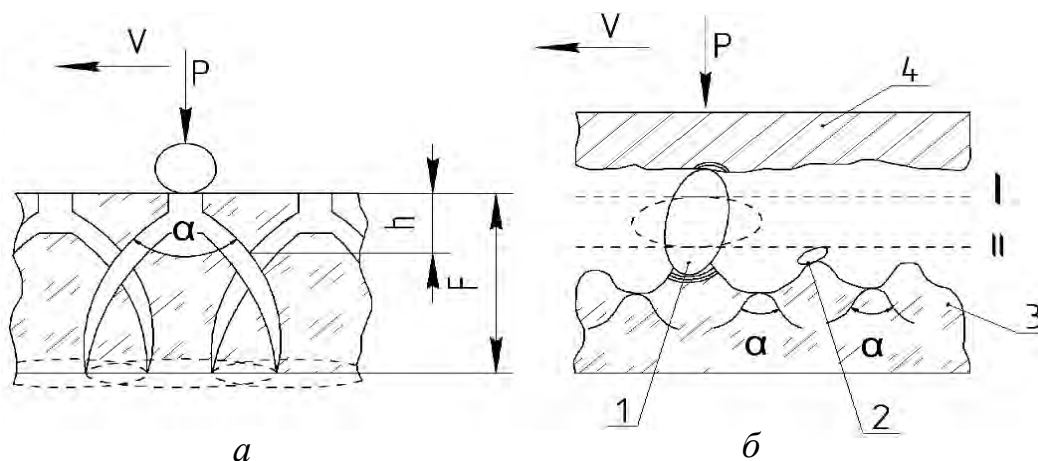


Рис. 3.1. Схема действия абразивного зерна на стекло

Трещины пересекаются между собой и отделяют частицы стекла от основной массы, в результате чего на поверхности образца образуется *рельефный* слой. Глубина h рельефного слоя примерно в три раза меньше глубины F поврежденного слоя. Следовательно, основным фактором разрушения поверхности стекла при шлифовании свободным абразивом является не просто царапание или резание образца острыми гранями зерен.

В процессе обработки увлажненные абразивные зерна 1 располагаются между поверхностями стекла 3 и шлифовальника 4 (рис. 3.1, б), которые перемещаются относительно друг друга с определенной относительной скоростью V и под некоторым давлением p . В результате трения абразивные зерна перекатываются между инструментом и деталью, воздействуя на них и друг на друга. При этом происходят срабатывание стекла, износ шлифовальника и разрушение самих зерен. Так как размеры зерен неодинаковы, то шлифовальник оказывает давление только на самые крупные зерна (например, зерно 1 на рис. 3.1, б). Во время движения шлифовальника и стекла зерна поворачиваются и шлифовальник ударяет по другим, менее крупным зернам (например, зерно 2 на рис. 3.1, б, положение II) или же по повернутым зернам в месте их наибольшего сечения (например, зерно 1 , положение I), благодаря чему действие шлифовальника носит *ударно-вибрационный* характер. При повторных ударах зерен по стеклу начинают отделяться его кусочки и образуется шлифованная поверхность.

Установлено, что угол α при вершине бугорков и впадин шлифованной поверхности стекла (см. рис. 3.1) определяется химическим составом последнего и не зависит от размеров зерен абразивов. Так, например, для кварцевого стекла $\alpha = 109^\circ$, а для стекол марок ТФЗ и К8 – соответственно 103 и 150° . Поэтому скорость шлифования пропорциональна увеличению угла α , поскольку увеличивается вероятность пересечения трещин.

3.2. Влияние основных технологических факторов на процесс шлифования

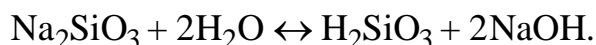
3.2.1. Действие жидкости

Действие жидкости на процесс шлифования может быть физическим, химическим и физико-химическим.

К *физическому* воздействию жидкости относятся:

- 1) распределение абразивных зерен по поверхности деталей и инструмента;
- 2) вымывание и удаление разрушенных кусочков стекла и абразивных зерен;
- 3) смазывание поверхностей деталей и инструмента, уменьшающее трение и способствующее более длительному сохранению механических свойств абразивных зерен;
- 4) отведение тепла, развивающегося при обработке;
- 5) смягчение ударно-вибрационного действия шлифовальника.

Химическое влияние жидкости. Ускоряющее действие воды объясняется гидролитическим разложением поверхностного слоя стекла, которое протекает по формуле



При испарении влаги имеем



Вода, проникая в трещины стекла, вступает в химическое взаимодействие с последней, в результате чего в трещинах образуется SiO_2 . Обладая большим объемом, чем стекло, SiO_2 расклинивает трещины в стекле, ускоряя его разрушение.

К *физико-химическим* влияниям жидкости относится взаимодействие молекул смачивающей жидкости и поверхности стекла. Известно, что жидкость, попадающая в микротрещины твердого тела, способствует его разрушению, если она обладает высокой энергией смачивания данного тела.

Для большинства стекол вода является поверхностно-активной жидкостью и производит значительное расклинивающее действие на стекло при его шлифовании. Для кварцевого стекла аналогичное действие вызывает скипидар.

Из рассмотренных факторов действие первого является основным.

3.2.2. Природа, величина и количество абразивных зерен

Важным свойством абразивного зерна является его устойчивость к разрушению. Более устойчивое зерно может передавать более высокое давление, и его действие на поверхность стекла будет эффективнее.

В результате исследований показано, что съем стекла в процессе шлифования увеличивается с ростом величины шлифующих зерен. Эта зависимость является линейной в диапазоне 3–200 мкм. При работе с более крупными зернами увеличение шлифования замедляется, поскольку вероятность попадания абразивных частиц размером 200 мкм и более между стеклом и инструментом уменьшается.

Увеличение эффективности шлифования большими зернами связано с тем, что такие частицы являются более прочными и могут передавать на стекло повышенное давление, вызывая тем самым более глубокий поврежденный слой в обрабатываемом материале.

Максимальный съем стекла в единицу времени обеспечивается при оптимальном расходе абразива определенной крупности. Расход ниже оптимального приводит к снижению производительности, увеличение расхода выше оптимального производительность не повышает, так как избыточные зерна в обработке не участвуют. Однако в настоящее время считают

целесообразным работать при расходе суспензии выше оптимального (неограниченного). В этом случае измельченные зерна быстрее заменяются новыми и всегда есть уверенность, что оптимальный расход обеспечен.

Экспериментально установлено, что при недостатке и избытке жидкой фазы абразивные зерна царапают поверхность стекла. При избытке воды количество абразивных зерен уменьшается, а давление на каждое из них возрастает. Вследствие этого зерна перестают свободно перемещаться (кантоваться) по поверхности стекла и, как бы заклиниваясь, царапают его. При недостатке воды обилие зерен также затрудняет их перекачивание.

3.2.3. Материал шлифовальника и скорость его вращения

Материал шлифовальника существенно влияет на процесс шлифования. Чем тверже материал, тем медленнее он истирается, сохраняя заданную кривизну поверхности, тем сильнее его ударно-вибрационное действие на абразивные зерна и, следовательно, тем сильнее разрушение стекол. Поэтому для обдирки выгодно изготавливать шлифовальники из стали или чугуна. Для мелкого шлифования, когда требуется уменьшить глубину разрушаемой поверхности перед полированием, целесообразно применять латунь, которая менее тверда, чем чугун, что очень важно для подгонки поверхности шлифовальника.

При обработке стекла пластмассовым шлифовальником глубина разрушения стекла еще более уменьшается в сравнении с латунным инструментом. Кроме того, при использовании пластмассовых шлифовальников на стекле почти не возникает царапин, что имеет место при шлифовании металлическим инструментом. Поэтому для ускорения полирования пластмассовые шлифовальники целесообразно применять на стадии окончательного мелкого шлифования. Однако производительность шлифования пластмассовым шлифовальником значительно ниже, чем металлическим.

При движении шлифовальника и стекла возникают ударно-вибрационные усилия, в сотни раз большие, чем при статическом давлении. Поэтому разрушение стекла пропорционально скорости. Однако при чрезмерном увеличении скорости абразивные зерна под влиянием центробежной силы сбрасываются со шлифовальника, не успевая воздействовать на стекло.

Для обдирочных работ линейная скорость, отнесенная к краю шлифовальника, может достигать 15–20 м/с. Для мелкого шлифования скорость значительно меньше и составляет 1–3 м/с.

3.3. Обработка стекла связанным шлифующим абразивом

В настоящее время на всех стадиях шлифования стекла широко применяются инструменты с закрепленным абразивом, в качестве которого используется синтетический алмазный порошок. В теле инструмента этот

порошок закрепляется различными органическими и металлическими связками (бутакриловая смола, сплав меди и железа и др.).

Процессы обработки закрепленным и свободным абразивами отличаются между собой. Сравнивая схемы действия сил на зерна (рис. 3.2), можно видеть, что в закрепленном зерне (рис. 3.2, а) при действии на него рабочего усилия P и относительном движении инструмента и заготовки возникают силы сжатия $F_{сж}$, изгиба $F_{изг}$ и среза $F_{ср}$, в то время как свободное зерно (рис. 3.2, б) испытывает только силы сжатия и трения.

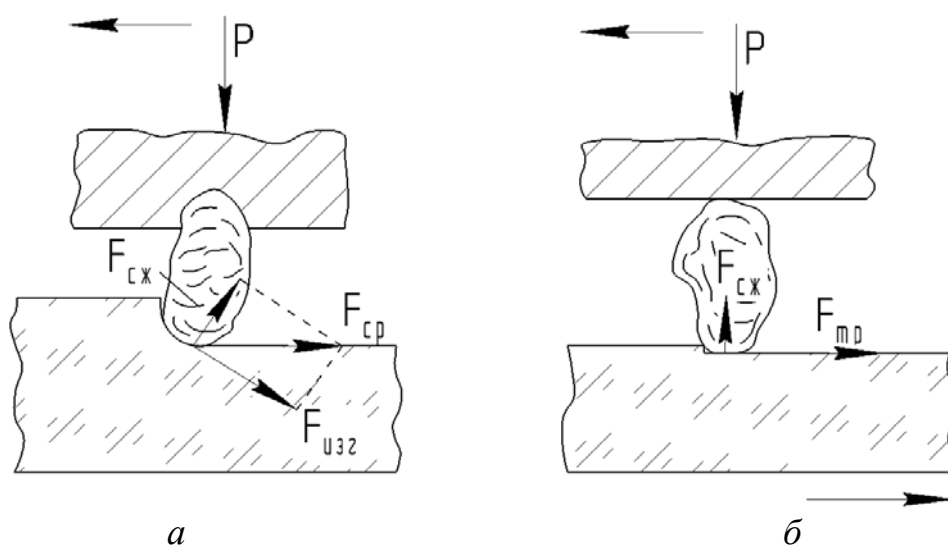


Рис. 3.2. Схема действия сил на закрепленное и свободное зерна в процессе обработки стекла

Сила сжатия во втором случае задерживает зерно, сообщая ему способность производить работу аналогично закрепленным зернам, т. е. царапанием (зерно скользит). При этом взаимодействие сил трения сообщает зерну вращательный момент, заставляя его перекатываться между поверхностями инструмента и стекла и производить ударно-вибрационное действие (зерно движется качением). Так как закрепленное зерно совершает только движение скольжения, то при одинаковом P , действующим на инструмент, давление на закрепленное зерно больше, чем на свободное (нет потери энергии на перекатывание зерна), и съём стекла выше.

Помимо ударно-вибрационного действия взаимные столкновения зерен в процессе обработки стекла свободным абразивом приводят к их ускоренному разрушению. Так как глубина поврежденного слоя стекла пропорциональна размерам зерен, то процесс уменьшения размеров зерна приводит к понижению съема стекла и увеличению расхода абразива.

Закрепленные зерна с течением времени затупляются, усилие резания увеличивается, и они выкрашиваются из связки, но не раскалываются. Вместо них в работу вступают новые зерна, и процесс шлифования идет с равномерной интенсивностью.

Характерно также, что закрепленный абразив вызывает не разрозненные точечные выколки, а сплошные царапины, т. е. работает как резец.

3.4. Сущность процесса полирования стекла

При полировании решают две основные задачи:

1) удаление следов шлифования до получения прозрачной поверхности с заданной степенью чистоты;

2) доведение кривизны поверхности по общим N и местным ΔN ошибкам согласно техническим условиям на деталь.

В процессе полирования с поверхности стекла удаляется слой в несколько микрометров, значительно меньший, чем при шлифовании. Однако время, необходимое для получения требуемой полированной поверхности, в несколько раз больше, чем на все операции шлифования.

Процесс полирования проходит при помещении увлажненного жидкостью полировального порошка между поверхностями стекла и подложкой полировальника.

Для понимания сущности процесса полирования основополагающее значение имеют работы И. В. Гребенщикова, который впервые выдвинул теорию полирования стекла, основанную на совместном действии *механических, химических и физико-химических* факторов. Гребенщиков показал, что скорость полирования стекла различных марок зависит от их *химической стойкости* и что менее химически стойкие стекла полируются быстрее, чем более стойкие, независимо от их механической твердости. Он доказал также, что скорость полирования стекла в присутствии воды значительно больше, чем в неводных средах, за счет гидролитического разложения стекла водой и образования поверхностной пленки, менее прочной, чем стекло. И. В. Гребенщиков установил, что введение в суспензию некоторых электролитов изменяет скорость полирования стекла по сравнению с полированием в дистиллированной воде. Исследования показали, что наибольшее ускорение полирования достигается при помощи хлорного железа (FeCl_3) и хлористого цинка (ZnCl_2).

И. В. Гребенщиков обнаружил, что на скорость полирования сильно влияет концентрация водородных ионов в суспензии. Наиболее быстро протекает процесс полирования в нейтральной и слабокислой среде. В сильнощелочной и сильнокислой среде полирование резко замедляется. Последний случай можно объяснить тем, что в данных условиях обработки поверхностная пленка получается очень плотной и механически прочно связанной с глубинным слоем стекла. Вследствие этого затрудняются дальнейшее растворение стекла водой, а также разрушение и удаление самой пленки.

Также он показал, что с увеличением температуры полируемой поверхности стекла происходит ускорение химических реакций, протекающих на поверхности стекла, и тем самым значительно увеличивается производительность полирования. Понижение температуры приводит к обратному результату.

По мнению И. В. Гребенщикова, зерна полирита, хорошо адсорбируясь поверхностями подложки полировальника и стекла, при взаимном их

перемещении срывают участки поверхностной пленки, толщина которой и определяет предельную точность полирования ($1/200\lambda$).

Большое значение для уяснения сущности полирования стекла представляют исследования В. М. Винокурова в области влияния свойств полировальных порошков на скорость полирования. Им установлено, что производительность полирования растет по мере увеличения размера зерен полирита и при размере зерен порядка 0,34 мкм процесс прекращается. В. М. Винокуров показал, что между поверхностями стекла и подложки полировальника имеется несжимаемый аномальный слой жидкости, толщина которого зависит от давления на инструмент.

Исследованиями В. М. Винокурова установлено, что полировальные зерна производят на стекле разрушения в виде микробороздок, направленных по движению зерен. Это свидетельствует о том, что при полировании происходит не хрупкое разрушение поверхности с образованием трещин (как при шлифовании), а удаление микростружки и полировальные зерна при работе закрепляются на подложке полировальника, а не кантуются, как при шлифовании.

В работах В. М. Винокурова также показано, что скорость полирования существенно изменяется в зависимости от степени смачиваемости суспензий полировальных зерен и подложки. Чем меньше смачиваемость, тем лучше зерна закрепляются на подложке и тем интенсивнее идет полирование. Уменьшение смачиваемости полировальных порошков может быть достигнуто обработкой их растворами олеиновой кислоты или неорганическими соединениями.

3.5. Влияние основных технологических факторов на производительность процесса полирования

3.5.1. Природа подложки полировальника

Для равномерного давления на полировальные зерна с практически различными размерами материал полировальника должен обладать упругими свойствами. Для обеспечения высокой точности полируемой поверхности поверхность инструмента должна длительное время сохранять свою форму. Для обеспечения эффективного полирования, т. е. быстрого получения чистой прозрачной поверхности образца, материал инструмента должен позволять хорошо закрепляться зернам полировального порошка на его поверхности. Для точной регулировки кривизны поверхности детали по общим и местным ошибкам необходимо легко и с большой чувствительностью корректировать кривизну поверхности инструмента.

Полировальники, изготовленные из металлов, плохо удовлетворяют указанным требованиям. Поэтому для полирования стекла используются неметаллические подложки, закрепляемые на приспособлении – полировальном инструменте. В качестве подложек применяют волокнистые материалы и композиции различных смол.

К волокнистым материалам относятся: войлок толщиной до 14 мм, фетр толщиной от 2,5 до 5 мм, мягкая кирза толщиной до 2 мм. Плотные материалы (например, фетр) обеспечивают лучшее качество поверхности, чем менее плотные (войлок).

Поверхность стекла, отполированная «суконными» (волокнистыми) полировальниками, получается слегка волнистой. Кроме того, такие полировальники не позволяют корректировать кривизну их поверхности, что необходимо для обеспечения высокой точности обрабатываемой детали.

Исследования процессов полирования при помощи «суконных» полировальников показали, что глубина микронеровностей поверхности, оставшихся после полирования, находится в пределах 0,06–0,12 мкм и не оказывает ощутимого влияния на разрешающую силу оптической системы. Поэтому «суконные» полировальники можно рекомендовать для обработки некоторых точных, например склеиваемых, поверхностей деталей визуальных систем, поверхностей коллективов, глазных линз и окуляров.

Важным свойством смоляной подложки является ее вязкость, которая позволяет полировальнику легко изменять свою форму и приобретать поверхность заданной кривизны как при его изготовлении, так и в процессе полирования деталей.

Вязкость подложки зависит от температуры смолы. Последняя, в свою очередь, изменяется в зависимости от температуры окружающего воздуха. Существует оптимальная вязкость смолы, при которой полирование стекла протекает наиболее интенсивно. В этом случае полировальные зерна наиболее выгодно закрепляются на поверхности подложки, а сама подложка наилучшим образом приспособляется к поверхности стекла и сохраняет приданную ей форму. Для обеспечения этого необходимо, чтобы предел текучести смолы не превышал напряжений сдвига. Практически оптимальную вязкость определяют режимом полирования и температурой воздуха.

При вязкости выше или ниже оптимальной производительность полирования падает. С увеличением вязкости полировальные зерна хуже закрепляются на поверхности подложки и быстрее смываются с нее. При пониженной вязкости зерна углубляются в смолу и плохо выполняют свою функцию. Кроме того, в этом случае смола растекается и изменяется кривизна поверхности полировальника. При полировании с помощью «твердой» смолы чистота обрабатываемой детали может быть несколько хуже, так как зерна полирита иногда царапают поверхность стекла.

Смоляные подложки позволяют легко корректировать величину их рабочей (эффективной) поверхности в различных участках путем подрезки. Эта операция заключается в нанесении на поверхности подложки канавок-резов каким-либо режущим инструментом.

Широкие возможности «управления» поверхностью смоляной подложки в процессе обработки образца позволяют вести полирование с высокой степенью точности.

Существенным недостатком смоляных подложек является значительное изменение их вязкости с изменением температуры окружающей среды и в зоне обработки, что затрудняет ведение полирования при интенсивных режимах.

В настоящее время ведутся работы по внедрению в оптическое производство пластмассовых полировальников, например пенополиуретановых.

3.5.2. Концентрация и расход полирующей суспензии

Исследования показали, что оптимальная концентрация для полирующей суспензии

$$\alpha = \frac{T}{T + Ж} = 0,1,$$

где Т и Ж – твердая и жидкая фазы суспензии.

Если расход полирующей суспензии превышает оптимальный, то происходит снижение производительности полирования. Это явление объясняется снижением температуры на поверхности стекла и замедлением химических реакций, происходящих в поверхностном слое стекла при полировании.

В то же время, придавая при полировании большее значение механическим факторам, в оптическом производстве полирование (как и шлифование) в большинстве случаев ведут при «неограниченном» расходе суспензии, т. е. всегда выше оптимального. Однако весьма часто при изготовлении некоторых деталей полирование ведут с «подсушенным» полировальником, т. е. с расходом суспензии менее оптимального. Полирование в этом случае протекает с повышенным нагревом смоляной подложки и стекла и сопровождается характерным звуком – «писком».

3.5.3. Температура поверхности стекла и окружающей среды

Установлено, что при изменении температуры воздуха от 5 до 20 °С производительность полирования увеличивается почти в два раза, после чего рост интенсивности процесса замедляется, а при температуре 50–60 °С практически не возрастает. Принято считать, что оптимальная для полирования температура окружающей среды должна находиться в пределах 22–26 °С.

При полировании следует учитывать также влияние температуры поверхностей полировальника и обрабатываемой детали на термические деформации последней при ограниченном и неограниченном расходе суспензии. При ограниченном расходе суспензии температурные деформации деталей небольших размеров незначительны. При больших размерах деталей эти деформации могут существенно влиять на точность детали. При неограниченном расходе суспензии термические деформации поверхности детали уменьшаются.

Глава 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

4.1. Основные сведения о кинематике станков для обработки оптических деталей

Слово «технология» происходит от греческого «технэ», означающего «искусство, мастерство, умение». Под технологией понимается совокупность способов и приемов достижения цели.

Станки для финишной обработки высокоточных оптических деталей по методу свободной притирки имеют один или несколько вертикальных шпинделей, на которые, в зависимости от условий обработки, закрепляют инструмент или блок. Инструмент или блок, закрепленные на шпинделе станка, называют *нижним звеном*. Для перемещений блока по инструменту (или наоборот) и передачи рабочего усилия на обрабатываемые детали станки снабжены механизмом *верхнего звена*.

Инструмент или блок крепят к шпинделю станка либо непосредственным навинчиванием их на шпиндель, либо через переходный патрон. Крепление блока или инструмента к механизму верхнего звена осуществляется с помощью поводка Z с шаровым наконечником (рис. 4.1, *a* и *б*), который свободно входит в гнездо хвостовика инструмента или блока и прижимается к нему под действием рабочего усилия P . При вращении инструмента с угловой скоростью ω_1 блок увлекается им в свободное вращение относительно оси поводка при обработке плоскостей (см. рис. 4.1, *a*) и оси O_1O_2 при обработке сферических деталей (см. рис. 4.1, *б*) с угловой скоростью ω_2 (ось O_1O_2 – прямая, проходящая через центр O_1 сферы инструмента и центр O_2 шарика поводка). Кинематически скорость ω_2 зависит от скорости ω_1 . Теоретически можно полагать, что при обработке плоскостей $\omega_2 = \omega_1$; при обработке сфер $\omega_2 = \omega_1 \cos \alpha$ (см. рис. 4.1, *б*). Практически, однако, на скорость ω_2 оказывают влияние состояние абразивной суспензии на поверхности нижнего звена, момент трения поводка, величина площади соприкосновения верхнего и нижнего звеньев, случайные сопротивления, тормозящие блок, и т. д. Поэтому скорость ω_2 непостоянна и составляет в среднем $(0,7-0,9)\omega_1$. Причем скорость ω_2 не может быть изменена при регулировании режима обработки.

Траекторию $O-O'$ центра O шара поводка при обработке плоскостей (см. рис. 4.1, *a*) и проекцию траектории $O_2-O'_2$ на плоскость при обработке сфер (см. рис. 4.1, *б*) называют *штрихом верхнего звена*.

В случае обработки плоскостей расстояние L по хорде между крайними положениями поводка при его колебательном движении (см. рис. 4.1, *a*) принято называть абсолютной длиной штриха, а отношение длины L к диаметру нижнего звена D_1 – относительной длиной штриха.

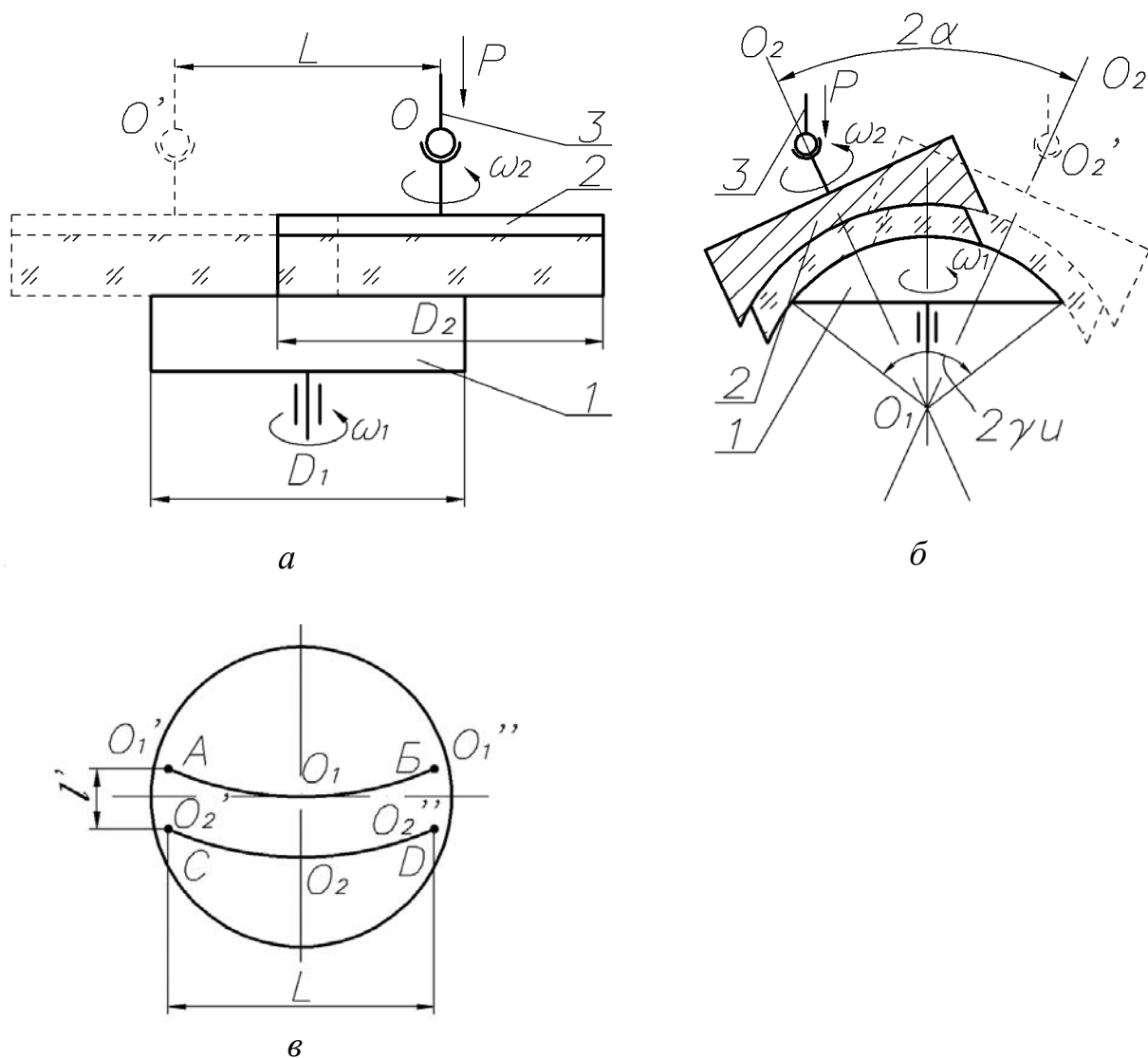


Рис. 4.1. Основные элементы траектории перемещения верхнего звена станка

При обработке сфер абсолютной длиной штриха называют угол 2α , образованный крайними положениями поводка (см. рис. 4.1, б), а относительной длиной штриха – отношение угла 2α к углу $2\gamma_{и}$ (или $2\gamma_{б}$), определяющему угловой размер нижнего звена.

Положение штриха может быть различным относительно оси шпинделя станка. Штрих может проходить через ось шпинделя (дуга АБ, см. рис. 4.1, в) и иметь смещения относительно нее (дуга СД). Различают три вида смещения: параллельное, перпендикулярное и комбинированное.

При параллельном смещении штрих $O_1'O_1O_1''$ проходит через ось шпинделя, но не симметричен ей ($O_1'O_1 \neq O_1O_1''$). Если штрих проходит от оси шпинделя на некотором расстоянии l и симметричен ей ($O_2'O_2 = O_2O_2''$), то это смещение называют перпендикулярным. Комбинированное смещение штриха представляет собой сочетание параллельного и перпендикулярного смещений.

4.2. Влияние относительной линейной скорости при обработке плоскостей

4.2.1. Способы оценки кинематического срабатывания при различных условиях обработки

Знание закономерностей изменения линейной относительной скорости различных точек поверхностей блока или инструмента позволяет оценить величину срабатывания этих поверхностей в зависимости от влияния данного фактора обработки (от скорости скольжения). Такое срабатывание называют *кинематическим*. Его оценку можно произвести построением эпюр (отрезков) Δ , являющихся либо функцией относительной линейной скорости v_0

$$\Delta = f(v_0),$$

либо функцией путей l , проходимых точками за определенное время обработки:

$$\Delta = f(l).$$

Рассмотрим различные схемы кинематического срабатывания инструмента и детали. При этом необходимо анализировать, в каких случаях целесообразнее строить эпюру кинематического срабатывания по отрезкам, пропорциональным длинам путей, а в каких – по отрезкам, пропорциональным относительным скоростям.

Пусть, например, плоская деталь 1 в виде прямоугольного треугольника ABC (рис. 4.2, *а*) в процессе обработки перемещается по неподвижному инструменту 2 в направлении стрелки 3 со скоростью v_0 . Тогда кинематическое срабатывание всех точек детали 1 , полностью перекрываемой инструментом 2 , будет постоянно и пропорционально времени (пути) перемещения (заштрихованная фигура детали 1 в верхней части рис. 4.2, *а*).

По-другому будет срабатываться инструмент 2 при воздействии на него детали 1 в виде треугольника ABC . За одно и то же время перемещения детали 1 над точкой 4 инструмента 2 пройдет только одна точка C детали, а над точкой 5 инструмента – множество точек детали в виде прямой AB . Следовательно, срабатывание инструмента 2 в зоне перемещения детали 1 будет неравномерным и зависит от степени перекрытия инструмента деталью.

Если поверхности детали 1 и инструмента 2 в процессе обработки все время полностью перекрывают друг друга и встречно вращаются (рис. 4.2, *б*), то их общее кинематическое срабатывание в любой точке (например, в точке A) пропорционально алгебраической разности линейных скоростей детали и инструмента, эпюры которых приведены в нижней части рис. 4.2, *б*, т. е.

$$v_O = v_O^{(1)} - (-v_O^{(2)}) = r_A(\omega_1 + \omega_2),$$

где r_A – расстояние от точки O до точки A на рис. 4.2, б.

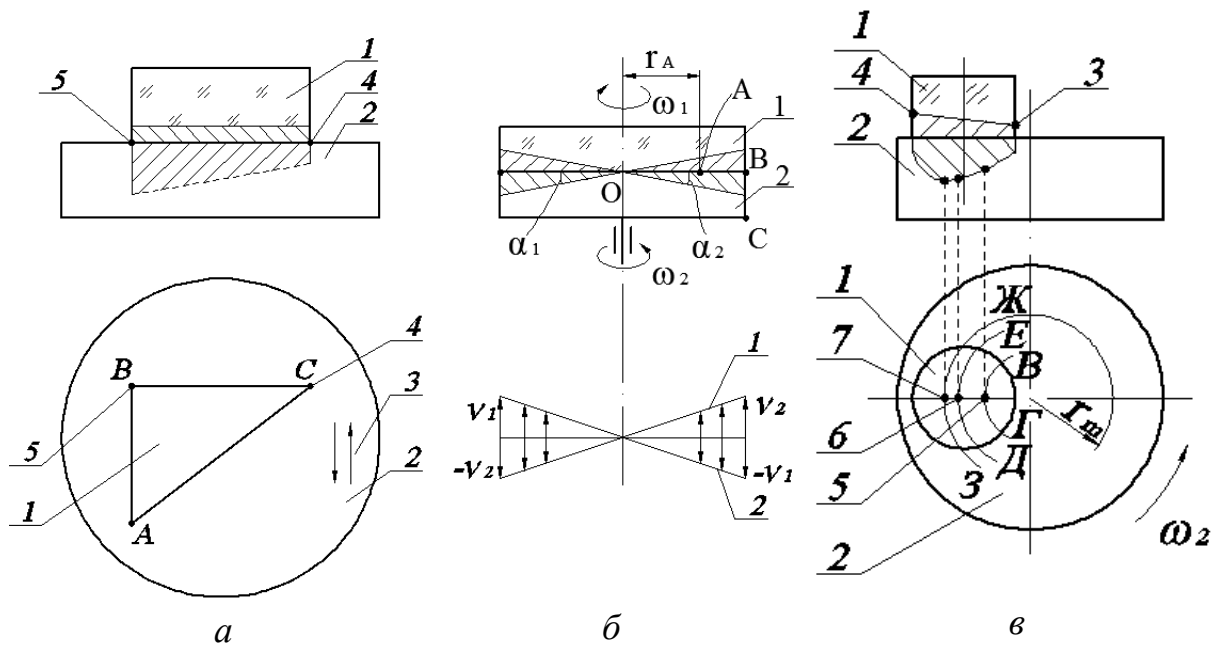


Рис. 4.2. Распределение эпюр кинематического срабатывания при различных условиях обработки

Пусть на рис. 4.2, в деталь 1 неподвижна, а инструмент 2 вращается с угловой скоростью ω_2 . Анализ этого рисунка показывает, что эпюру кинематического срабатывания детали целесообразно строить по скоростям, а инструмента – по длинам путей. Учитывая это, замечаем, что максимальное кинематическое срабатывание детали 1 будет в точке 3, а минимальное – в точке 4, так как оно пропорционально только скорости:

$$v = \omega_2 r_m,$$

где r_m – расстояние между точкой m обрабатываемой поверхности детали 1 и осью вращения инструмента 2.

Поскольку точки 5, 6, 7 инструмента 2 соприкасаются с поверхностью детали 1 только частично, проходя пути, равные дугам соответственно ВГ, ДЕ, ЖЗ, то максимальное кинематическое срабатывание инструмента 2 будет в точке 7, проходящей наибольший путь ЖЗ при соприкосновении с деталью 1.

4.2.2. Поступательное движение плоской детали по неподвижному инструменту

Данное движение возможно при ручной доводке детали 2 по инструменту 1 (рис. 4.3, а). В этом случае траектории всех точек поверхности де-

тали параллельны друг другу и она срабатывается равномерно (участок А на детали 2), поскольку все точки находятся в одинаковых условиях. При движении детали 2 на инструменте 1 будет срабатываться участок Б (см. сечение по В-В), причем максимальное кинематическое срабатывание будет в середине участка, а минимальное – на краях. В результате инструмент будет изборозжен канавками. Поэтому для равномерного срабатывания инструмента необходимо перемещать деталь по всей его поверхности, непрерывно меняя направление или вращая инструмент.

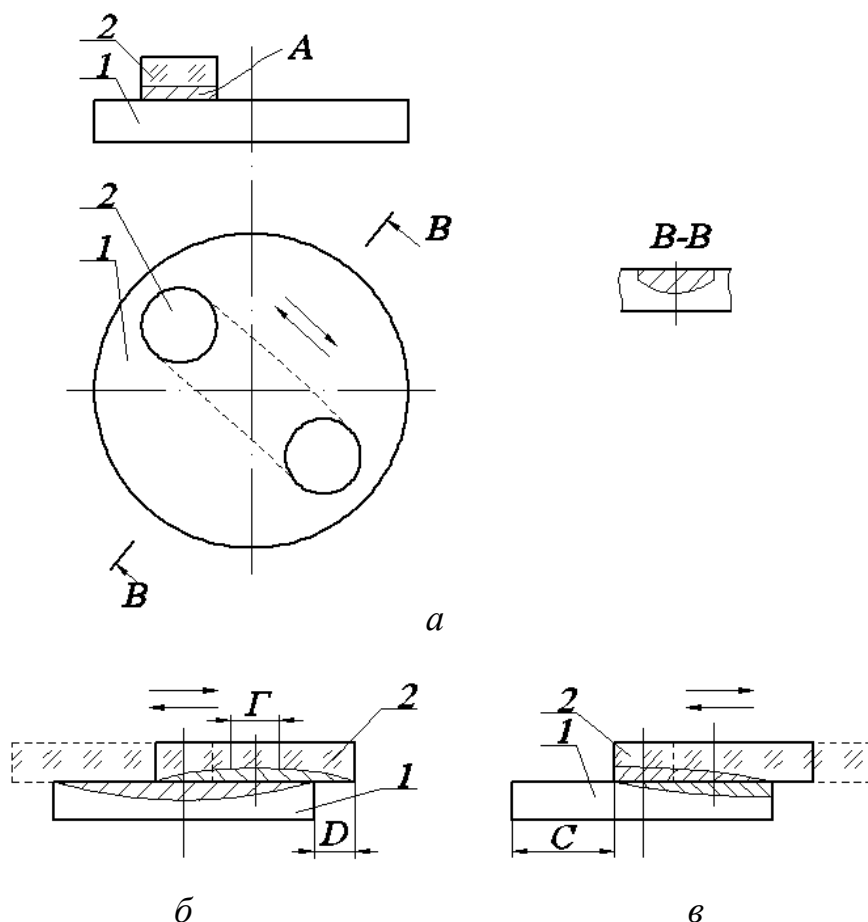


Рис. 4.3. Распределение эюр срабатывания при поступательном перемещении заготовки с плоской поверхностью

Если диаметры инструмента и детали близки по величине или равны, то в процессе обработки края детали будут выходить за края инструмента (рис. 4.3, б и в). Когда штрих детали симметричен относительно центра инструмента (рис. 4.3, б), на обеих плоскостях образуется непрерывно обрабатываемая центральная зона Г, в то время как крайние зоны Д некоторое время не будут соприкасаться друг с другом. Вследствие этого поверхности детали и инструмента получаются вогнутыми. Если штрих детали направлен в одну сторону от центра инструмента (рис. 4.3, в), то кинематическое срабатывание краев дисков будет несимметричным.

4.2.3. Влияние относительной линейной скорости при обработке сферических деталей

В случае ручной обработки линз с помощью вращающегося инструмента кинематическое срабатывание детали пропорционально скорости $v = \omega_1 r$ и, следовательно, оно неравномерно (r – расстояние от оси вращения инструмента до рассматриваемой точки Б на детали). Эпюры срабатывания поверхностей деталей, представленные на рис. 4.4, а, показывают, что при вращении инструмента 2 минимальное срабатывание поверхности детали будет при ее расположении на вершине гриба, а максимальное – на его краю.

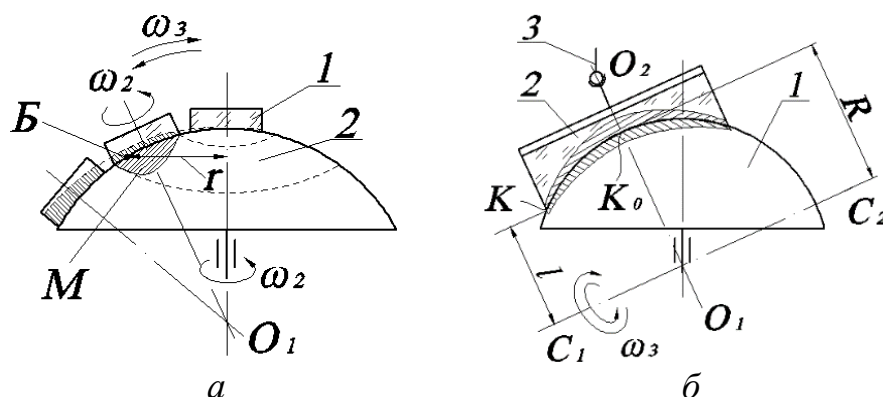


Рис. 4.4. Распределение эпюр срабатывания при поступательном перемещении заготовки со сферической поверхностью

Более равномерное срабатывание поверхности деталей можно получить при их дополнительном вращении вокруг своей оси (скорость ω_2). Однако обработка заготовки на одном и том же участке поверхности инструмента, как и при обработке плоскости, приводит к неравномерному его срабатыванию. Поскольку в данном случае условия срабатывания инструмента такие же, как и на рис. 4.2, в, то на обрабатываемой поверхности появится кольцевая зона М с несимметричным профилем. Поэтому обработка детали на одном и том же участке поверхности инструмента недопустима. Деталь должна совершать дополнительное движение (скорость ω_3) через вершину инструмента.

При обработке сферических деталей, когда поводок совершает колебательное движение, кинематическое срабатывание поверхности заготовки в произвольной точке К пропорционально линейной относительной скорости

$$v_K = \omega_3 l,$$

где l – длина нормали, опущенной из точки К на мгновенную ось $C_1 C_2$ (рис. 4.4, б).

Следовательно, если учитывать только колебательное движение детали 2 по инструменту 1, то максимальное кинематическое срабатывание ее поверхности будет в точке K_0 на оси симметрии, так как в этом случае длина l максимальна и равна R .

4.3. Влияние давления при обработке плоскости

Определим закономерность срабатывания детали и инструмента в зависимости от рабочего усилия Q на поводке. Сила Q , оказывающая давление на деталь, приложена к точке A контакта шарового наконечника поводка 4 с хвостовиком 3 наклеечного инструмента (рис. 4.5). Эту силу можно разложить на две составляющие: Q_{Γ} и $Q_{\text{В}}$.

Наличие расстояния l между точкой A и притирающимися поверхностями вызывает образование опрокидывающего момента $Q_{\Gamma}l$, прижимающего при движении детали ее переднюю часть к поверхности инструмента. Вследствие этого давление на край детали будет увеличиваться, что приведет к более сильному ее срабатыванию, т. е. образуется «завал края» M . Этот завал можно ослабить, если уменьшить момент $Q_{\Gamma}l$, т. е. приблизить точку A приложения силы Q к обрабатываемой поверхности, или обеспечить выход детали за край инструмента. В последнем случае края детали будут соприкасаться с инструментом меньшее время, чем середина. Вес же детали и величина силы Q будут действовать на меньшую площадь обрабатываемой поверхности, в результате чего срабатывание средней ее части усиливается по отношению к выступающим краям, компенсируя влияние момента $Q_{\Gamma}l$. Одновременно с этим сильнее срабатываются края инструмента. В случае вращения последнего и выхода детали за его край еще сильнее срабатываются середина детали и край инструмента вследствие большей линейной скорости на его краях.

При обработке сферической поверхности неравномерность срабатывания от действия опрокидывающего момента проявляется незначительно.

4.4. Влияние неравномерного измельчения абразивных зерен и корректировки поверхности инструмента

Поскольку в процессе обработки оптических деталей на станках модели ШП (ПД) абразивная суспензия наносится на периодически открывающиеся края блока (инструмента), то более крупные зерна будут усиленно срабатывать края блока, в то время как в его среднюю зону будут посту-

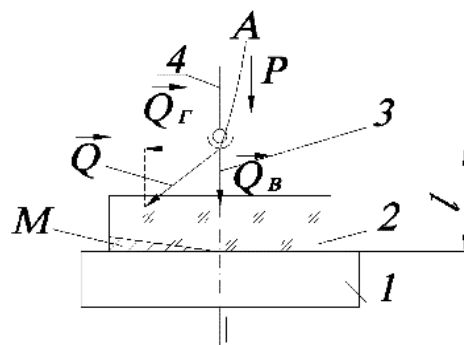


Рис. 4.5. Распределение эпюры срабатывания при обработке плоских поверхностей

пать несколько измельченные зерна с более низкой шлифующей (полирующей) способностью. В результате появляются завалы краев, и качество их поверхности становится более грубым по сравнению с серединой.

Неравномерность измельчения абразивных зерен уменьшается при подаче суспензии помпой через центр блока. Кроме того, влияние данного фактора в определенной степени компенсируется выходом краевой зоны блока за край инструмента.

Так как при обработке по методу свободного притирания детали принимают форму поверхности инструмента, то, изменяя профиль последнего путем механической обработки, можно регулировать величину срабатывания заготовки в соответствующих зонах. В «подрезанных» зонах абразив будет действовать на стекло менее интенсивно и участки детали, соответствующие данным зонам инструмента, будут обрабатываться медленнее по сравнению с другими участками поверхности. Местная правка инструмента для регулирования процесса шлифования – операция довольно сложная, поэтому ее применяют редко. Значительно выгоднее вести обработку без подрезки шлифовальника путем соответствующей настройки станка. Подрезка же смоляных полировальников исключительно эффективна и обеспечивает точное регулирование процесса полирования.

4.5. Влияние факторов настройки станка

4.5.1. Влияние длины штриха и его смещения

Увеличение длины штриха повышает производительность обработки, но усиливает срабатывание краев нижнего звена (образуется «бугор») и середины верхнего (появляется «яма»). Указанные явления можно объяснить большей линейной скоростью по краю нижней поверхности.

Длину штриха L уточняют опытным путем при каждой операции шлифования или полирования. Этот геометрический наладочный параметр станка влияет на процесс формообразования больше, чем изменение давления или скорости. Увеличение смещения штриха усиливает срабатывание центральной зоны верхней поверхности, выводя блок в зону большей линейной скорости нижнего звена. При обработке плоскостей инструментом, расположенным снизу, можно рекомендовать относительное смещение по штриху в пределах от 0 до 0,4. При обработке сфер лучшие результаты получаются при смещении перпендикулярно штриху.

Для работы без подрезки шлифовальника целесообразно применять штрих, проходящий через центр шпинделя с симметричным отклонением от него в обе стороны. Причем $L/D_{ин}$ должно быть около 0,4–0,5 ($D_{ин}$ – диаметр инструмента). Для исправления отклонений поверхности от заданной формы этот диапазон необходимо расширить до 0,7.

4.5.2. Влияние скорости вращения шпинделя и колебательных движений поводка верхнего звена

При настройке станка обычно учитывают отношение ω_1 / ω_2 или $n_{ш} / n_{кр}$, где ω_1 и ω_2 – угловые скорости вращения шпинделя станка и его кривошипа соответственно; $n_{ш}$ и $n_{кр}$ – число оборотов шпинделя и кривошипа станка в минуту соответственно. При этом следует отметить, что:

1) при постоянной скорости ω_2 и увеличении скорости ω_1 срабатывание возрастает прямолинейно;

2) постоянной угловой скорости ω_1 и увеличении скорости ω_2 срабатывание также возрастает;

3) увеличении соотношения ω_1 / ω_2 усиливается срабатывание края нижней поверхности, связанной со шпинделем, вследствие чего возрастает срабатывание середины верхней поверхности и ослабляется срабатывание ее краев. Уменьшение отношения ω_1 / ω_2 приведет к обратному результату;

4) $\omega_1 / \omega_2 < 1,0$ обеспечивается ускорение полирования, но ухудшается качество поверхности. При точном полировании целесообразно работать при $\omega_1 / \omega_2 > 1,0$, но близким к единице. Равенство скоростей ω_1 и ω_2 вызывает зональные (местные) ошибки на поверхности блока.

При обработке плоских поверхностей качество поверхности улучшается с уменьшением ω_1 / ω_2 от 0,8 до 0,4. Для точной обработки плоскостей или сфер с незначительной кривизной выгоднее, чтобы $\omega_1 / \omega_2 < 1$. Блоки, близкие к полусфере, целесообразнее обрабатывать при ω_1 / ω_2 , достигающем до 2,5.

4.5.3. Влияние способа подачи абразивной суспензии

Съем стекла при автоматической подаче обрабатывающей суспензии примерно в 1,5 раза больше, чем при ручной подаче. В то же время при подаче суспензии через центр блока съем стекла примерно в 1,5 раза больше, чем при подаче через край. Неравномерность срабатывания форм поверхностей при автоматической подаче суспензии больше, чем при ручной, что приводит к неравномерной шероховатости деталей при шлифовании и появлению местных ошибок при полировании.

Глава 5. ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКИМ ДЕТАЛЯМ И МЕТОДЫ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

5.1. Чертежи оптических деталей

Чертеж полностью характеризует оптическую деталь и служит исходным документом для разработки технологического процесса ее изготовления и контроля.

Детали располагают на чертежах по ходу луча света, идущего слева направо. Асферические поверхности определяют уравнением кривой профиля поверхности вращения. Цилиндрическую поверхность задают значением ее радиуса R , перед которым пишут «Цилиндр».

В правом верхнем углу чертежа располагают таблицу, в которой указывают требования к материалу, к детали и расчетные данные. Если деталь изготовлена из оптического бесцветного стекла, то в требованиях к материалу указывают допустимые отклонения показателя преломления Δn_b и средней дисперсии $\Delta(n_F - n_C)$, оптическую однородность, двойное лучепреломление, светопоглощение, бесвильность, пузырность. При изготовлении деталей из цветных стекол вместо значений Δn_b и $\Delta(n_F - n_C)$ приводят цветовые данные стекла. В частности, указывают границы пропускания по спектру $\lambda_{пр}$ и наибольшее значение коэффициента поглощения E_{λ_0} .

Требования к деталям подразделяются на общие и характерные для деталей определенного типа. К общим требованиям относится класс чистоты P полированных поверхностей, указывающий число и размеры допускаемых дефектов на этих поверхностях (точек, царапин, выколок, ласин и др.) и отступление их от заданной кривизны (N и ΔN – общая и местная ошибки).

Помимо указанного, для линз в таблице приводят допустимую величину несовпадения геометрической и оптической осей линзы, называемую децентрировкой (C), а также класс точности пробного стекла ΔR .

Для призм приводят допустимые отклонения пирамидальности π , разности углов δ_{45° и разрешающей способности ε , а для плоскопараллельных пластин – клин θ и допустимое фокусное расстояние f'_{\min} .

Из расчетных данных приводят значения световых диаметров, длину хода l луча в призме, а также фокусное расстояние и фокальные отрезки для линзы.

В поле чертежа и примечаниях указывают дополнительные конструктивные особенности и технологические требования, например: требования к гравировке штрихов и знаков, обозначение покрытия с указанием его шифра и т. п.

В основной надписи пишут наименование детали, марку стекла и ГОСТ, массу детали, масштаб чертежа. Для сборочных единиц таблица не приводится.

5.2. Показатели качества деталей

Отклонение кривизны полированной поверхности от заданной определяют интерференционным методом путем сравнения с эталоном. Если наложить на контролируемую поверхность детали 1 (рис. 5.1, а) точно изготовленную поверхность эталона 2 (пробное стекло) и осветить их, то при наличии незначительного воздушного зазора между поверхностями будут видны интерференционные кольца (см. рис. 5.1, а) или полосы (рис. 5.1, б).

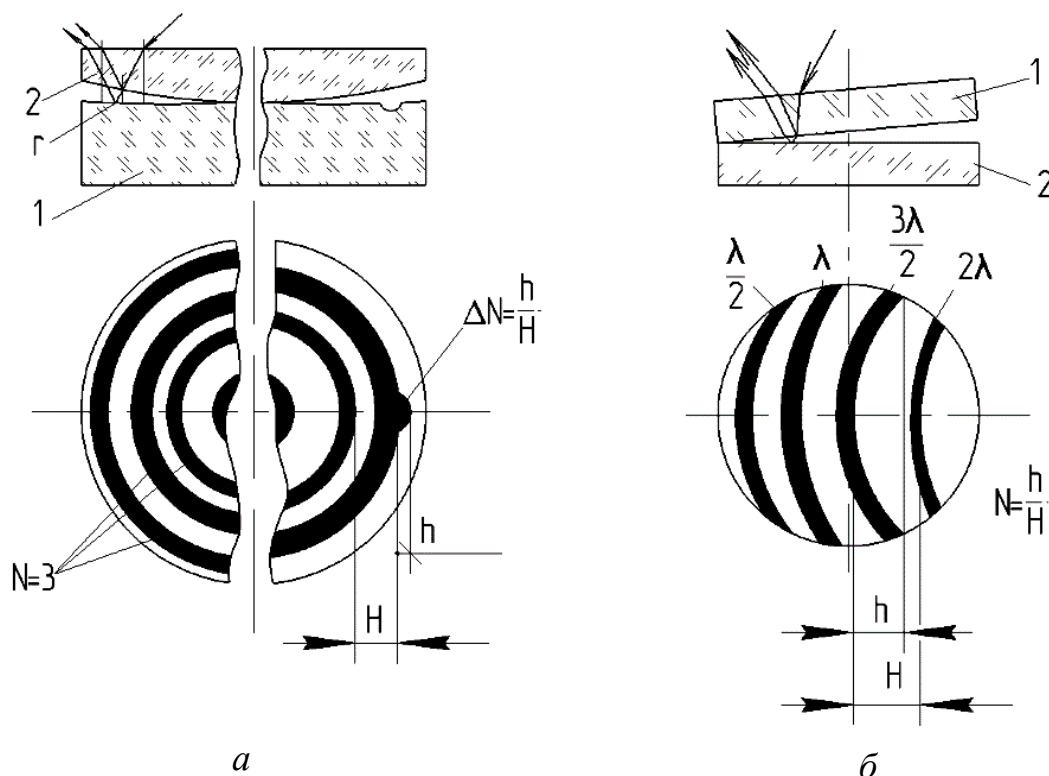


Рис. 5.1. Оценка точности детали по интерференционной картине

Известно, что условие минимума интерференционной картины

$$\Delta m = 2t + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2},$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$;

t – толщина воздушного зазора между соприкасающимися поверхностями.

При $m = 1$ получим

$$\Delta = 2t + \frac{\lambda}{2} = \frac{3}{2} \lambda,$$

откуда $t = \lambda / 2$. При $\lambda = 555$ нм получим, что величина воздушного зазора, соответствующая одному кольцу, приблизительно равна 250 нм (0,25 мкм).

В производственном обиходе интерференционную картину обычно называют «цветом», так как при освещении белым светом линии имеют радужную окраску.

Сосчитав число колец по какому-либо цвету спектра, определяют величину отступления поверхности детали от поверхности пробного стекла. Отклонение от заданной поверхности называют величиной общей ошибки и выражают числом интерференционных колец или полос N . При данном методе контроля определяется не отклонение от самого радиуса кривизны, а только отступление от стрелки прогиба поверхности пробного стекла.

В некоторых случаях N указывают со знаками «плюс» или «минус». Это значит, что в первом случае имеется касание пробного стекла и детали в центре (зазор на краю), во втором – касание на краю (зазор в центре). В производственном обиходе отклонения первого случая называют «бугром» (крупный или широкий цвет), второго – общей «ямой» (узкий или мелкий цвет).

Для определения знака N и ΔN существует несколько способов:

1. Если при нажатии деревянной палочкой или карандашом на край верхней детали система полос передвигается по направлению к точке нажатия, то контролируемая поверхность выпуклая, и наоборот.

2. Если при нажатии в центре верхней детали диаметр колец увеличится, то имеет место «бугор», и наоборот.

Если величина зазора между поверхностями детали и пробного стекла будет менее 250 нм, то общая ошибка поверхности должна быть меньше одного кольца. В этом случае при оценке ошибки поверхности будет виден не полный спектр цветов, соответствующий одному кольцу, а лишь некоторое число цветов (соломенный, сталистый цвета), что затрудняет оценку точности обработки детали. В таких случаях поступают следующим образом. На испытуемую деталь 2 накладывают пробное стекло 1 и последнее прижимают к краю детали, создавая воздушный клин (см. рис. 5.1, б). Интерференционная картина в этом случае будет представлять собой ряд искривленных полос постоянной ширины H . Величина ошибки поверхности N характеризуется кривизной полос и определяется стрелкой их прогиба h , выражаемой в долях ширины полосы, т. е. $N = h/H$.

Если кривизна поверхности детали изменяется плавно, то интерференционная картина имеет вид правильных кругов или полос (см. рис. 5.1, а, б). Однако на контролируемой поверхности часто имеются и отдельные местные неровности (см. рис. 5.1, а, правая сторона). В этом случае кольца или полосы искривляются. Отступление колец (полос) от правильной формы определяет величину местных неровностей поверхности (местных ошибок). Их величина выражается в долях ширины полосы и обозначается ΔN ($\Delta N = h/H$).

Если на интерференционной картине кольца вытянуты в одном и сжаты в другом направлении (рис. 5.2) или изогнутые полосы не составляют часть окружности, то имеется общее отклонение формы поверхности от сфериче-

ской, которое называют астигматичностью поверхности и определяют как разность числа колец N по осям AB и CD . Геометрически астигматичность означает, что оптическая поверхность стала сфероцилиндрической.

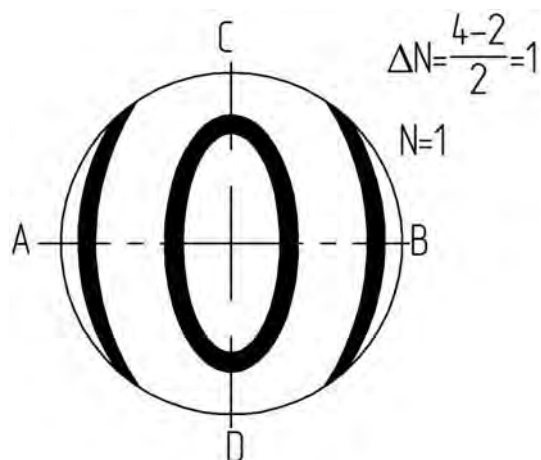


Рис. 5.2. Определение величины локальной погрешности

Если диаметр детали D_d больше диаметра пробного стекла $D_{пр. ст}$, то для поверхности детали справедлива формула пересчета числа колец:

$$N_d = (D_d / D_{пр. ст})^2 N_{пр. ст}.$$

Местные ошибки формы оптических поверхностей уменьшают предел разрешения ε оптической системы, который не компенсируется размерами толщин и радиусов линз, воздушных промежутков. Поэтому требования к допустимым значениям ΔN строже, чем к N . Все полированные поверхности оптических деталей имеют шероховатость 13-го и 14-го классов, обозначаемых соответственно $Rz 0,1$ и $Rz 0,05$. Требования к чистоте этих поверхностей регламентированы двенадцатью классами чистоты P : 1-10, 1-20, 1-40, I, II, ..., IX. Первые три используются для деталей, расположенных в плоскости промежуточного изображения предмета (шкалы, сетки, лимбы), а остальные – для деталей, удаленных от плоскости изображения.

Децентричность C линзы выражается в миллиметрах и вызывает появление aberrаций комы, астигматизма и поперечного хроматизма.

Пирамидальность π призмы выражается в угловой мере и представляет собой непараллельность ребер призмы или непараллельность ребра одного из углов к наружным исполнительным граням. Пирамидальность призмы уменьшает ее разрешающую способность.

Разность углов δ_{45° призмы также выражается в угловой мере. Если $\delta_{45^\circ} \neq 0$, то развертка призмы представляет собой не плоскопараллельную пластинку, а клин, который отклоняет лучи от расчетных направлений и вносит хроматизм.

Отклонение значения угла крыши призмы от 90° вызывает двоение изображения, что снижает разрешающую способность.

Предел разрешения ε выражается в угловых секундах. На его значение влияют однородность, двойное лучепреломление и бессвильность стекла, N , ΔN , а также π и δ_{45° для призмы.

Значения фокусного расстояния и фокальных отрезков указаны по данным расчета оптической системы прибора и служат для составления таблиц комплектации линз и проверки оптических параметров деталей.

5.3. Виды операций обработки стекла

В технологии изготовления оптических деталей можно выделить три группы операций обработки стекла: основные, специальные и вспомогательные.

Основные операции сопровождаются удалением с обрабатываемой поверхности заготовки слоев стекла различной толщины, а также изменением формы заготовки, ее размеров и качества поверхности. Такими операциями являются резание, сверление, фрезерование, шлифование, полирование.

Специальные операции изменяют свойства полированных поверхностей. Сюда относятся:

соединение деталей в блоки склеиванием, силами молекулярного сцепления (оптическим контактом) и спеканием (ГОК);

нанесение на поверхность деталей различных покрытий, а также шкал и сеток.

Вспомогательные операции проводят для выполнения основных и специальных операций обработки. К таким операциям относят:

блокировку (крепление заготовок и деталей на приспособления);

разблокировку (снятие деталей с приспособления);

промывку деталей и приспособления;

нанесение на обработанные поверхности защитных покрытий.

5.4. Общие сведения о типах производства и технологическом процессе

Существуют единичное, серийное и массовое производства.

Единичное производство – это производство, при котором изделия (детали) изготавливаются в небольших количествах, при этом повторного изготовления этих деталей или не бывает, или оно повторяется через такие периоды, что всякая связь между их изготовлением теряется. В данном случае используют имеющуюся в цехе оснастку. Специальная оснастка, как правило, не изготавливается.

Серийное производство – производство, при котором заранее предусматривается и планируется изготовление деталей сериями (партиями). В зависимости от размера серии различают мелкосерийное и крупносерий-

ное производство. Мелкосерийное мало отличается от единичного, а крупносерийное приближается к массовому производству. В случае крупносерийного производства разрабатывают приспособления и широко используют специальное оборудование.

Массовое производство – производство, при котором детали изготавливаются в больших количествах и длительное время. Оборудование специальное и выполняет одну и ту же строго определенную работу. Основная часть работ механизирована и выполняется с применением специальных приспособлений.

Оптическое производство относится к смешанному типу.

Производственным процессом называют совокупность всех действий, в результате которых материалы и полуфабрикаты (прессовки, брусковое стекло) превращаются в готовые детали. К этим действиям относятся получение материалов и прессовок, контроль их качества, хранение и транспортировка к месту обработки, изготовление, упаковка и отправка деталей в сборочный цех или на склад готовых деталей.

Технологическим процессом называют часть производственного процесса, заключающуюся в непосредственном изменении формы, размеров или свойств обрабатываемой заготовки.

Технологический процесс предусматривает самую производительную экономичную обработку заготовки, является основным законом для изготовления деталей и подлежит безусловному выполнению.

Составными частями технологического процесса являются операция, установка, переход.

Операцией называется законченная часть технологического процесса обработки, выполняемая на одном рабочем месте над одной или несколькими одновременно обрабатываемыми заготовками до снятия с обработки и перехода к обработке другой заготовки или группы заготовок.

Установкой называется часть операции, выполняемая в период между закреплением заготовки для обработки и ее раскреплением, т. е. при неизменном ее закреплении.

Переходом называется часть операции шлифования или полирования, выполняемая одним инструментом при одной установке заготовки и заканчивающаяся получением новой поверхности.

5.5. Технологическая документация

В технологическом процессе описана последовательность применяемых операций, переходов и содержатся указания по их выполнению.

Одной из форм технологической документации является маршрутная карта с приложением операционных карт. Дополнительно выпускаются спецификации заготовок оптических деталей, сферических инструментов, пробных стекол и других видов оснастки. Для некоторых ответственных операций выпускаются инструкции (склейки, фотолитографии, гравировки и др.).

Маршрутная карта содержит эскиз готовой детали и перечень всех операций в технологической последовательности. Для каждой операции указываются необходимые данные: номер операционной карты, тип оборудования, количество деталей на блоке и другие основные данные.

В операционных картах указывают все данные, необходимые для выполнения определенной работы и получения высокого качества деталей:

- 1) эскиз детали с размерами и маркой стекла;
- 2) тип оборудования и режим его работы;
- 3) обрабатывающие инструменты и приспособления;
- 4) измерительные инструменты и приборы;
- 5) вспомогательные материалы.

Кроме указанных стандартизированных документов разрабатывают ТУ на поставку заготовок и согласовывают их со стекловаренными заводами. В ТУ помещают чертеж заготовки с размерами, учитывающими припуски на обработку и допуски на изготовление заготовок, указывают технические требования к стеклу и заготовке, размер партии.

На основе технологических документов разрабатывают чертежи оснастки, инструмента, нормативы времени на изготовление оптических деталей и нормы расхода вспомогательных материалов.

Глава 6. БЛОКИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

6.1. Требования к блокировке оптических деталей и к наклеечным веществам

Соединение заготовок оптических деталей для совместной их обработки называют *блокировкой*. Сочетание приспособления и закрепленных на нем деталей называют *блоком*.

Способы блокировки оптических деталей должны обеспечивать ряд требований:

- 1) возможность контроля размеров деталей в процессе их обработки;
- 2) прочность соединения;
- 3) минимальную деформацию деталей;
- 4) простоту и быстроту блокировки и разблокировки.

Оптические детали блокируют следующими методами:

- 1) сжатием в приспособлениях;
- 2) фиксацией силами капиллярного натяжения жидкости;
- 3) приклеиванием;
- 4) заливкой твердеющим раствором;
- 5) соединением при помощи «оптического контакта»;
- 6) под влиянием собственного веса в сепараторах.

При изготовлении линз с большой кривизной поверхностей и крупногабаритных линз применяют блоки с одной деталью (штучное крепление).

Наклеечные вещества должны быть химически нейтральными к полированным поверхностям оптических деталей и хорошо удаляться с них путем растворения в соответствующих жидкостях. Эти вещества должны иметь темный цвет, на фоне которого легко обнаруживать различные дефекты полированной поверхности.

Важнейшие свойства наклеечных веществ – вязкость, адгезия (прилипаемость), размягчение при определенной температуре, коэффициент объемного теплового расширения, растворимость.

Вязкость является основным свойством наклеечных веществ. Она изменяется от температуры смолы, которая зависит от температуры окружающего воздуха и температуры обрабатываемой детали. Чем выше температура, тем меньше вязкость. Поэтому при интенсивных режимах обработки для блокировки следует применять более вязкую смолу, так как в противном случае приклеенная к приспособлению деталь может сдвинуться с места и обработка будет неправильной. Требуемую вязкость смол достигают путем подбора их составляющих компонентов.

Величина адгезии определяет прочность сцепления смолы с деталью и приспособлением.

Коэффициент объемного теплового расширения смол влияет на их способность деформировать поверхность деталей. Этот коэффициент для смол значительно выше, чем для стекол. Поэтому стекла изменяют свой объем при нагреве или охлаждении значительно меньше, чем смола, и, будучи скреплены с ней, деформируются. Например, при охлаждении смолы, нагретой при склейке, происходит уменьшение ее объема (усадка), благодаря чему деталь 1 (рис. 6.1, а) стягивается смолой 2, в результате чего обрабатываемая поверхность 3 детали 1 изогнется (рис. 6.1, б).

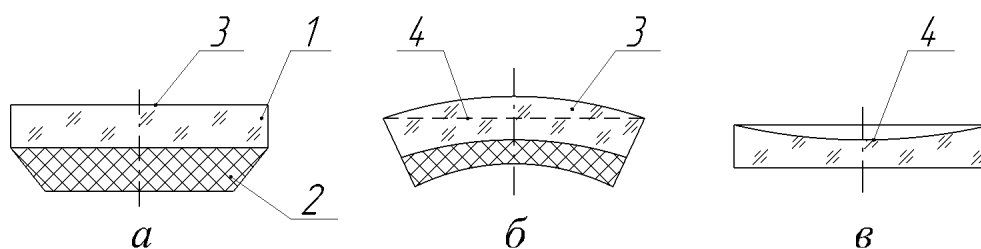


Рис. 6.1. Деформирование заготовки при блокировке смолой

В процессе обработки детали деформированная поверхность 3 приобретает правильную кривизну, например, 4 (см. рис. 6.1, б, пунктирная линия). Однако когда клей будет удален, деталь вследствие упругих деформаций несколько разогнется и обработанная поверхность 4 станет неправильной (рис. 6.1, в).

Аналогичное явление произойдет с деталью при нагреве смолы, только в этом случае свободная поверхность изогнется в другую сторону. Опыт показывает, что деформирующее действие смол ослабляется при уменьшении их усадки и повышении теплопроводности. Установлено, что наимень-

шие деформации поверхностей вызывает каменноугольный пек, наибольшие – парафин. Также на величину деформаций влияют толщина слоя смолы и тепловые свойства материала приспособления. Наибольшие деформации возникают при блокировке на приспособления из дюралюминия, а наименьшие – при наклейке на приспособления из стекла, имеющего низкий коэффициент расширения.

С ростом толщины слоя смолы увеличивается деформация, поэтому для ее уменьшения целесообразно применять тонкие слои. Для уменьшения деформации деталей смолой следует медленно охлаждать блоки после приклеивания заготовок к приспособлениям, а также проводить отжиг блоков в термостате.

6.2. Склеивание и блокировка заготовок при предварительной обработке

6.2.1. Склеивание столбиков

Соотношение между шириной и диаметром столбика и его длиной принимают в пределах 1:4–1:10. Перед склеиванием заготовки промывают водой, протирают насухо и нагревают. Нагрев должен быть равномерным. Его считают законченным, если клей при соприкосновении с нагретой заготовкой начинает плавиться. Для склеивания применяют клеечные воски.

Заготовки, смазанные тонким слоем клея, накладывают друг на друга, получая столбик. Чтобы он имел правильную форму (цилиндра или призмы), столбик в нагретом состоянии устанавливают в различные приспособления (угольники) и сжимают, вытесняя избыток клея. В приспособлениях столбик охлаждают постепенно. Недопустимо опускать столбик в холодную воду, так как при этом он расклеивается.

6.2.2. Блокировка заготовок

При грубой обработке, например подгонке толщины кусков стекла после распиливания, блокировку проводят при помощи тонкого слоя клеечного парафина или воска. Процесс приклеивания заготовок к приспособлениям сходен со склеиванием их в столбики. Для обеспечения тонкого равномерного слоя клея заготовки следует тщательно прижимать к приспособлению. С целью получения точных призм (по углу) и пластин (по клину) применяют стеклянные приспособления.

6.3. Способ эластичной блокировки линз

Заготовки на приспособлении крепят путем приклеивания их смолой средней твердости слоем значительной толщины. Такое основание для деталей обладает эластичными свойствами. Толщина слоя смолы для выпуклых линз по оси и для вогнутых по краю составляет примерно 0,1–0,2 от диаметра линзы. Смолу на детали наносят в виде подушек-плашек.

Для крепления плоскопараллельных пластин применяют планшайбы, для линз – грибы и чашки, для призм – планшайбы с пазами.

Марку наклеечной смолы обозначают буквой Н (наклеечная) и цифрой, выражающей логарифм вязкости смолы. Марку смолы выбирают в зависимости от режима обработки (скорость, давление) и температуры воздуха в цехе. Чем интенсивнее режим обработки и выше температура воздуха, тем больше канифоли должно быть в смоле.

Чтобы обрабатываемая поверхность блика имела правильную сферу (или плоскость), блокируемые заготовки 1 притираются к поверхности притирочного приспособления 2 (рис. 6.2). Количество линз на поверхности приспособления определяют расчетом. Для очистки блока от остатков абразива между линзами оставляют зазор $b \cong 0,05 D_{л}$.

На смоляные подушки притертых линз накладывают наклеечное приспособление 3, нагретое до температуры 80–100 °С; подушки размягчают и приклеивают к приспособлению. После этого блок охлаждают на воздухе или в воде, температура которой 16–20 °С. Блок осторожно снимают с притирочной формы, а излишек смолы между линзами удаляют. После блокировки поверхности линз блока промывают, а иногда и зачищают от следов смолы. Аналогичным образом блокируют призмы.

Так как смола при затвердении деформируется, рекомендуется начать обработку сразу же после блокировки, фиксируя тем самым правильное положение деталей, достигнутое в процессе притирки.

Достоинством эластичной блокировки являются простота и универсальность наклеечных приспособлений. Из рис. 6.2 видно, что при одних и тех же радиусах кривизны $R_{д}$ и $R_{н.п}$ обрабатываемой поверхности деталей и наклеечного приспособления диаметры и толщины линз, а также радиусы кривизны вторых поверхностей деталей могут очень сильно различаться. Это весьма удобно при изготовлении деталей опытных партий и мелких серий: для различных деталей используются одни и те же приспособления. Метод блокировки позволяет обрабатывать линзы с точностью до одного кольца и с допуском на толщину до 0,01 мм. Однако обработка тонких линз (особенно – отрицательных менисков) с высокой точностью затруднительна, так как большие смоляные массы подушек деформируют поверхности обрабатываемых деталей, что понижает точность обработки. Уменьшения деформирующего действия смолы можно достигнуть, помещая между подушкой и линзой бумажную прокладку диаметром $(1/2-1/3)D_{л}$. Обильная подача на блок абразивной суспензии в процессе обработки также снижает деформацию поверхностей деталей и уменьшает размягчение смолы.

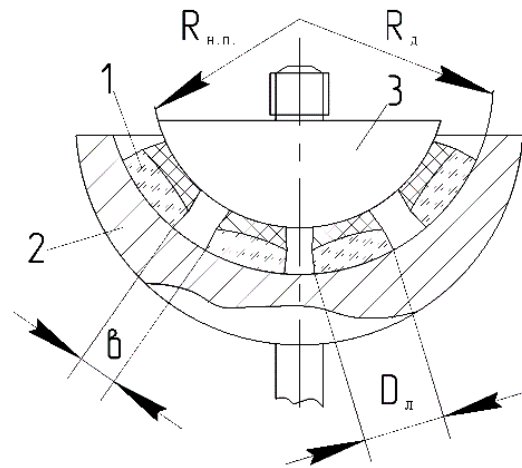
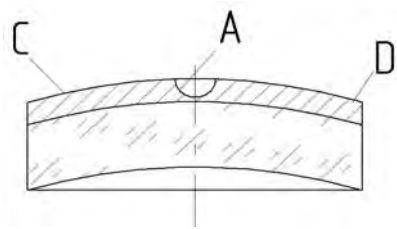


Рис. 6.2. Эластичное крепление линз

Применять эластичный метод блокировки можно только после того, как грубое шлифование (обдирка) заготовок закончено, либо вручную поштучно, либо другим способами, что усложняет технологический процесс.



При эластичной блокировке толщину линз проверяют по контрольным лункам *A* (рис. 6.3), имеющимся на некоторых из них в центре и на краях блоков.

Рис. 6.3. Контроль толщины линзы по контрольным лункам

Обработку ведут до тех пор, пока поверхность *CD* не коснется дна лунки.

6.4. Способ жесткой блокировки линз

Крепление линз *1* жестким способом производится приклеиванием заготовок при помощи тонких смоляных прокладок (просмоленная марля или бязь толщиной 0,1–0,3 мм) на клеечные приспособления, имеющие специальные посадочные места, форма и размеры которых определяются конфигурацией заготовок (рис. 6.4, *a*).

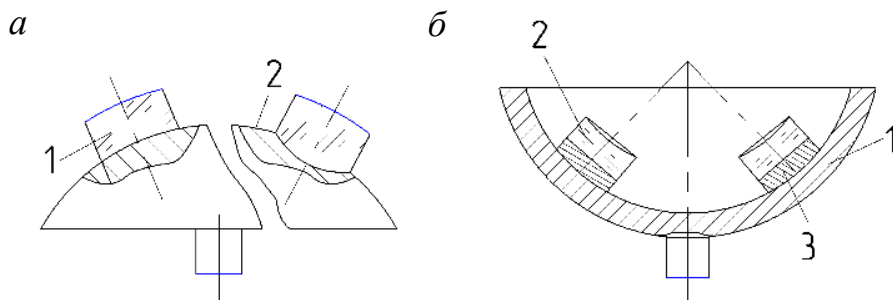


Рис. 6.4. Схема жесткой блокировки линз

Тонкий клеечный слой мало деформирует поверхности деталей и не позволяет им перекашиваться при размягчении.

При несоответствии кривизны поверхностей клеечного приспособления *1* и приклеиваемой детали *2* на приспособлении закрепляют шайбы *3* (рис. 6.4, *б*).

Перед блокировкой клеечные приспособления и заготовки нагревают в термостате или на плите. Температура нагрева приспособления составляет 80–100 °С, а деталей – несколько ниже. Затем в лунку приспособления кладут пропитанную смолой прокладку, накладывают на нее линзу и с помощью деревянной палочки или специального пресса выжимают остатки смолы. После наклейки линз блоки остывают на воздухе, причем линзы дополнительно в процессе остывания подправляют палочкой.

Данный способ блокировки позволяет обрабатывать детали блоками при высокопроизводительных режимах, начиная от обдирки или фрезеровки и кончая полированием.

К недостаткам способа следует отнести некоторую сложность и дороговизну наклеечных приспособлений, так как их можно применять только для деталей определенной формы и размеров, поэтому жесткий метод блокировки рационален лишь при массовом и крупносерийном производстве деталей, когда указанные недостатки метода компенсируются высокой производительностью обработки.

6.5. Блокировка призм твердеющим раствором

При методе блокировки твердеющим раствором призмы или столбики призм закрепляют в блок путем их заливки твердеющим раствором. Основным компонентом раствора является измельченный и хорошо просушенный гипс.

При смешивании гипса с водой получают раствор, который после затвердевания увеличивается в объеме. Если гипсовым раствором 2 залить призмы 7, установленные на планшайбе 5 (рис. 6.5) внутри обода 3, то при затвердевании раствора блок деформируется. При этом поверхность блока изгибается, а призмы поворачиваются, вследствие чего при обработке будут появляться ошибка в углах призмы, а также пирамидальность и косина. Во избежание деформаций блока в гипс добавляют определенное количество цемента, раствор которого при затвердевании уменьшается в объеме и нейтрализует расширение гипса.

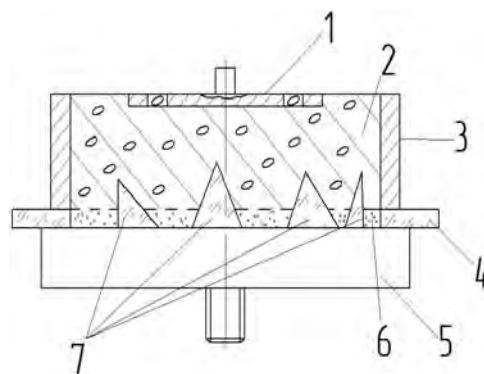


Рис. 6.5. Крепление оптических деталей твердеющим раствором

Предназначенные для блокировки призмы очищают, промывают и притирают к планшайбе 5 (см. рис. 6.5), плоскость которой обработана с высокой точностью. Притирка призм производится либо по тонкому слою машинного масла, либо по слою парафина или воска. В процессе притирки призмы располагают так, чтобы максимально использовать площадь планшайбы, соблюдая при этом симметричность расположения деталей. После притирки призм по краям планшайбы 5 устанавливают три стеклянные пластинки 4 толщиной 2–3 мм. Последние предназначены для того, чтобы призмы при обработке выступали за края обода. Затем устанавливают обод 3 и промежутки между призмами 7 заполняют просеянными древесными опилками до образования тонкого (2–3 мм) слоя 6. После этого детали заливают раствором 2 и устанавливают на него крышку 1. Для снятия блока с планшайбы последнюю нагревают до размягчения парафина.

Этот метод блокировки призм применяется, как правило, для обработки только первой их стороны. Метод прост. Приспособления для него дешевы и универсальны, позволяют блокировать детали различной формы.

К недостаткам метода относятся деформация блока при затвердевании раствора и значительное время этого процесса.

6.6. Блокировка высокоточных деталей

Для обеспечения высокой точности обработки ряда деталей, например линз, имеющих большую кривизну поверхностей с небольшой толщиной по оси, плоскопараллельных пластин с узким допуском на клиновидность и точных призм, необходимо максимально уменьшить деформации поверхностей деталей наклеичной смолой. Это достигается различными способами.

При полужестком методе блокировки тонких отрицательных менисков *1* (рис. 6.6, *а*) их склеивают сначала при помощи просмоленной матерчатой ткани *2* с промежуточной стальной прокладкой *3*, которую, в свою очередь, смолой *4* приклеивают к приспособлению *5*. Этот способ можно применять и для блокировки призм.

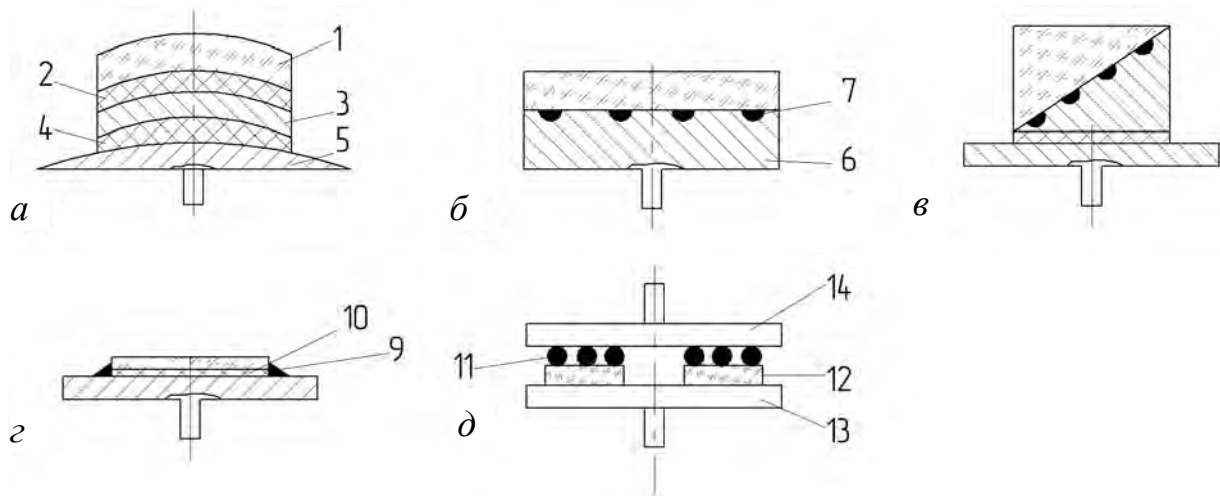


Рис. 6.6. Схемы крепления деталей высокой точности

Для уменьшения площади соприкосновения смолы с деталью применяют планшайбы *б* (рис. 6.6, *б*) с заполненными смолой канавками *7*, растровые приспособления *8* (рис. 6.6, *в*), кольца (полоски) из смолы *9* (рис. 6.6, *г*), приклеивающие деталь за боковые поверхности, при этом под деталь помещают матерчатую прокладку *10*.

Для обработки пластин с точностью поверхности в пределах $N = 0,5-2$, колец и при отношении толщины к диаметру порядка $1:8 \dots 1:10$ применяют блокировку шариками с диаметром 6–8 мм, изготовленными из смолы с вязкостью $\eta_{25} = 10-10,3$. Шарики *11* (рис. 6.6, *д*) в определенном порядке наносят на поверхность слегка прогретой детали *12*. Притерев детали к притирочной планшайбе *13*, на шарики накладывают наклеичную планшайбу *14*, нагретую до 50–60 °С. Невысокая температура нагрева способствует уменьшению деформации смолы.

6.7. Блокировка призм и пластин оптическим контактом

Способ крепления основан на силах молекулярного сцепления двух точно отполированных и чистых стеклянных поверхностей детали *1* (рис. 6.7, *а*)

и контактного приспособления 2. Поверхность приспособления, предназначенную для крепления деталей, и поверхности деталей обрабатывают с большой точностью по N (0,5–1 кольцо).

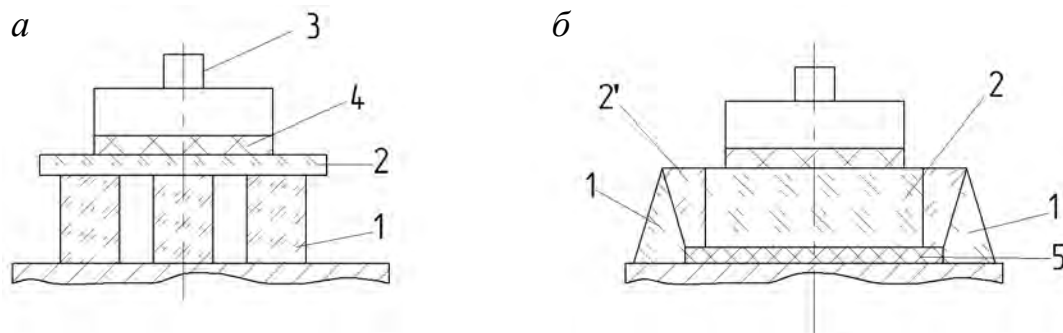


Рис. 6.7. Крепление деталей методом оптического контакта

Перед блокировкой поверхности приспособления и детали тщательно очищают спиртом и для удаления пылинок обмахивают беличьей кисточкой. Деталь накладывают на приспособление, причем она должна плавно скользить (плавать) по поверхности контактного приспособления, что свидетельствует об отсутствии пылинок, а при наблюдении поверхности должна быть видна интерференционная картина. Для возникновения молекулярного сцепления между приспособлениями и деталью последнюю прижимают к приспособлению до исчезновения интерференционной картины. Наличие отдельных радужных окрасок в плоскости контакта свидетельствует о плохой чистоте соприкасающихся поверхностей. Чтобы между поверхностями детали и приспособления не попала вода (что снизило бы прочность блокировки), края детали и приспособления покрывают защитным лаком.

Контактные приспособления для обработки призм должны обрабатываться с высокой точностью углов и параллельности сторон. Допуски на углы иногда доходят до $1''$. В случае необходимости иметь сложное контактное приспособление можно использовать переходный «сухарик» 2' (рис. 6.7, б). Так как контактное приспособление в процессе обработки деталей изнашивается, то необходимо, чтобы стекло, из которого оно изготовлено, обладало большой твердостью. Для обеспечения высокой точности обработки деталей нужно, чтобы стекло приспособления имело минимальный коэффициент расширения. Планшайбу 3 к контактному приспособлению 2 приклеивают слоем смолы 4.

Для исключения срабатывания контактного приспособления 2 (см. рис. 6.7, б) и «сухарей» 2' в процессе обработки призм 1 при закреплении последних под контактное приспособление с «сухариком» подкладывают лист 5 из папиросной бумаги.

При контактном способе блокировки можно обрабатывать детали с точностью поверхности до $N < 1$ кольца и углов – до $1''$. Однако на практике высокое качество поверхности на всех контактируемых деталях получить трудно вследствие местных ошибок поверхностей деталей и контакт-

ных пластин, разности коэффициентов расширения деталей и контактных пластин, их деформаций в процессе соединения, а также в результате нагрева от рук и механических усилий при обработке. Поэтому обработанные на оптическом контакте детали иногда доводят при креплении эластичным способом или в сепараторном приспособлении.

Для снятия деталей с оптического контакта выполняют локальный нагрев (на открытом пламени) или охлаждение (с помощью эфира) детали или приспособления.

Существует также безнаклеечный метод блокировки деталей в сепараторах.

6.8. Блокировка детали действием сил капиллярного натяжения жидкости

В методе блокировки действием сил капиллярного натяжения установочный элемент 1 (рис. 6.8) выполнен из пористого материала (графита, керамики, металлокерамики) и пропитан жидкостью с высоким коэффициентом поверхностного натяжения, малой вязкостью, низким давлением пара. Тонким слоем клеящего вещества 2 пористый материал соединен с корпусом 3. При наложении детали 4 на установочный элемент жидкость, находящаяся в порах по-

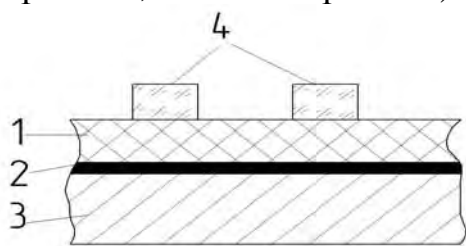


Рис. 6.8. Крепление детали действием сил капиллярного натяжения

верхностного слоя, создает силы капиллярного натяжения, которые направлены по нормали к плоскостям детали и прочно удерживают ее. В тангенциальном направлении эти силы малы, поэтому для предупреждения смещения заготовок в приспособлении должны быть опоры.

Установочный элемент приспособления и установочная база обрабатываемых деталей могут быть тонкошлифованными или полированными. Данный метод блокировки можно использовать при изготовлении деталей с относительной толщиной до 1 : 50.

Глава 7. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ. АЛМАЗНЫЙ ИНСТРУМЕНТ

7.1. Резание стекла

Резание стекла производится при разделке листов толщиной до 15–20 мм. Операция резания состоит из образования трещины в стекле и раскалывания стекла по поверхности трещины. В качестве инструмента для резания стекла применяют алмазные резцы, ролики и резцы с твердосплавной пластинкой. Ввиду хрупкости алмаза им можно резать только

полированные поверхности. Металлические ролики и резцы используют для резания шлифованного и полированного стекла.

Перед резанием стекло размельчают с помощью линейки и карандаша (простого – для шлифованных поверхностей и воскового – для полированных). Иногда под лист стекла удобно подкладывать размеченный лист бумаги.

Ролик для резания стекла представляет собой диск диаметром 5–10 мм, изготовленный из закаленной стали или твердых сплавов (победита РЭЗ, ВК8 и др.). Режущий край ролика должен быть хорошо заточен под углом 50–60°.

Кристаллический алмаз с острыми гранями, предназначенный для резания стекла, заделывают либо в медную оправку, либо в сплав свинца с цинком так, чтобы режущая кромка выступала за поверхность сплава. Угол между режущими кромками зерна алмаза должен быть 60–80°. При резании стекла алмаз необходимо держать перпендикулярно к плоскости пластины. Усилие на инструмент должно быть незначительным. Нельзя проводить дважды по одной и той же линии надреза. Также не допускается пересечения линий надреза и соскальзывания алмазного стеклореза о края стекла. Поверхность стекла должна быть чистой; жировые загрязнения не допускаются.

Резка листового стекла на круглые заготовки производится в приспособлении стеклорезом, которое последний перемещает по окружности.

7.2. Раскалывание, распиливание и кругление стекла

Надрезанное стекло раскалывают при помощи молотка или ломающего пресса. При раскалывании молотком по стеклу наносят короткие и не- сильные удары вдоль всей линии надреза с противоположной стороны. При этом трещины проникают вглубь стекла.

Если же необходимо расколоть плоский кусок стекла значительной толщины, то удобно использовать пресс (такое стекло должно быть хорошо отожжено). При этом стекло укладывают на острую призму (клин) и раскалывают на части путем силового воздействия на пластину.

Для увеличения глубины трещины надрезанного стекла целесообразно увлажнить линию надреза.

Распиливание применяют для разделки кусков стекла значительной толщины в тех случаях, когда невозможно использовать пресс или необходимо получить заготовки сложной конфигурации.

Основными движениями при распиливании являются вращательное движение пилы и поступательное движение (подача) заготовки. Глубокие распилы выполняют с двух противоположных сторон стекла на глубину, несколько большую половины полного распила. Перед концом распиловки подачу уменьшают, а отпиливаемую часть стекла поддерживают зажимом. Удерживать стекло руками запрещается. Распиловку ведут при обильной по-

даче эмульсии или содового раствора. В качестве пил применяют металлические диски с закрепленным по периферии алмазонасным кольцом (слоем).

При круглении заготовке или группе заготовок, соединенных в столбик, придают цилиндрическую форму. Круглению подлежат заготовки светофильтров, защитных стекол, клиньев, круглых пластин и линз, когда их изготавливают не из прессовки. Операцию выполняют на круглошлифовальных станках, на обдирочных станках вручную и специальных станках для кругления. Чтобы избежать выколов, по краям столбика приклеивают дополнительные защитные стекла. В качестве СОЖ используют эмульсию. Контроль диаметра деталей после кругления производят скобами, штангенциркулями, микрометрами.

7.3. Сверление и высверливание стекла

Операции сверления и высверливания применяют для получения отверстий в оптических деталях или круглых заготовках из листового стекла. В качестве инструмента используются сверла с закрепленным одиночным кристаллом алмаза, алмазные трубчатые сверла и металлические трубки.

Сверла из кристаллов алмаза используют для получения отверстий диаметром до 2 мм (рис. 7.1, а). Сверлят по предварительной разметке на сверлильных станках с применением ручной подачи. В качестве СОЖ используют машинное масло, керосин, скипидар. В процессе сверления сверло периодически поднимают над заготовкой, чтобы СОЖ проникла в зону обработки. На поверхности заготовки в местах «входа» и «выхода» сверла появляются выколки. Чтобы их избежать, с двух сторон заготовки приклеивают пластинки из стекла или на заготовке оставляют дополнительный припуск на сошлифование после сверления.

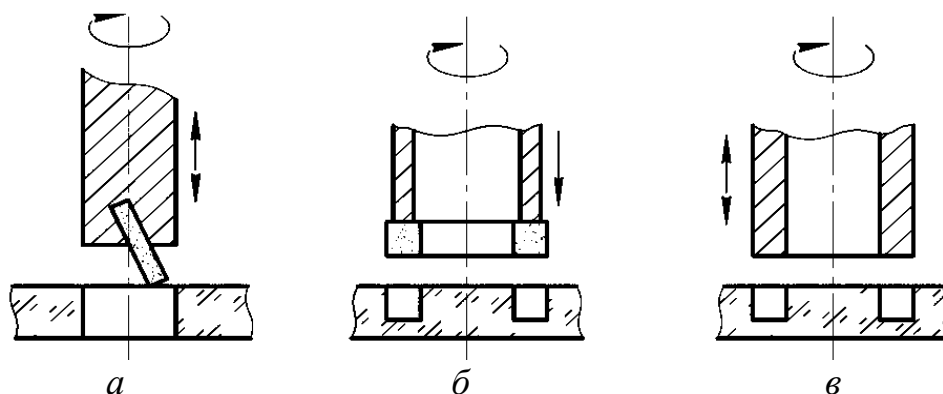


Рис. 7.1. Сверление стекла

Алмазные трубчатые сверла (рис. 7.1, б) применяют для сверления отверстий и высверливания круглых заготовок диаметром от 2 до 200 мм. Сверлят по разметке на вертикально-фрезерных или координатно-расточных станках при подаче около 0,1 м/мин и скорости резания 15–20 м/с.

Металлические трубки (рис. 7.1, в) со свободным абразивом применяют для сверления и высверливания заготовок диаметром от 3 до 150 мм. Сверление производят на вертикально-сверлильных станках с ручной подачей и периодическим подъемом трубки над заготовкой. Абразивная суспензия подается в зону обработки вручную. Этот способ используется только в мелкосерийном производстве, так как процесс трудоемкий и не обеспечивает качества сверления.

7.4. Алмазные абразивные круги

Алмазные круги состоят из корпуса и укрепленного на нем алмазного рабочего слоя, представляющего собой однородную смесь зерен алмазного порошка со связкой и иногда – с наполнителем. Главными характеристиками алмазоносного слоя являются:

- 1) сорт или марка алмаза;
- 2) зернистость алмаза;
- 3) связка;
- 4) концентрация алмаза в связке.

Сорт алмазного порошка или его марка определяются природой и свойствами алмаза, из которого он изготовлен, т. е. указывают, что он является природным или одной из разновидностей синтетического. Выбор вида алмазного порошка определяется его работоспособностью и эффективностью при выполнении того или иного вида обработки.

Зернистость алмазного порошка определяет производительность и чистоту обработки и устанавливается в зависимости от его назначения (режущие свойства алмазно-абразивного инструмента улучшаются с увеличением размеров зерен, а чистота обработки повышается с уменьшением этих размеров).

Основным назначением связки является обеспечение необходимой прочности закрепления зерен алмаза в инструменте, что определяет работоспособность алмазного шлифовального круга. Для обработки твердых и вязких материалов используют менее прочные (мягкие), а для обработки хрупких и не слишком твердых – более прочные связки. Связки бывают органические, керамические и металлические.

В качестве органических связок применяют фенолформальдегидные смолы (бакелиты) различных марок, эпоксидные смолы и резину в вулканизированном состоянии (вулканит). Для повышения механической прочности и износостойчивости алмазного слоя в связку вводят наполнители в виде порошков из абразивов, металлов или карбидов тугоплавких металлов. Для обработки оптических материалов на операциях, связанных с необходимостью интенсивного удаления больших припусков, инструмент на органической связке не пригоден в силу низкой размерной стойкости, снижающей точность обработки и вызывающей повышенный расход алмаза. Эту связку применяют в основном для полирования оптических деталей,

а иногда – и для их тонкого алмазного шлифования (ТАШ). Органические связки на основе бакелитов условно обозначаются буквой Б с дополнительным цифровым или буквенным индексом (например, Б1, Б2, БК и т. п.), характеризующим содержание наполнителя или других добавок в связке.

Керамические связки применяют в виде соединений оксидов, глинистых и стеклообразных веществ с температурой спекания не выше 800 °С. Керамические связки обозначают буквой К с цифровым или буквенным индексом (например, К1, К2 и т. п.), характеризующим вид связки и ее состав по основным компонентам. Для обработки оптических деталей алмазный инструмент на керамической связке из-за ее низкой износостойкости применяется редко.

Металлические связки для алмазного инструмента представляют собой порошкообразные металлы или их сплавы, которые тщательно перемешивают с алмазным порошком, а затем прессуют и спекают. Алмазный инструмент на металлической связке обладает наиболее высокими прочностью и износоустойчивостью, которые могут в широких пределах регулироваться свойствами компонентов, входящих в связки. Металлические связки широко применяют при обработке твердых и хрупких материалов, в частности стекла и кристаллов, и обозначают буквой М с цифровыми и буквенными показателями (например, М1, М5, М10 и т. п.), характеризующими состав и свойства связки. Для изготовления инструмента на металлических связках используются более прочные синтетические алмазы, такие как АСР, АСВ и АСК, а также порошки из природных алмазов. В качестве связки используются различные композиции на основе меди, олова, алюминия, железа, никеля и других материалов. Наряду с другими требованиями состав связки выбирается с учетом того, что температура спекания инструмента была ниже температуры сгорания и графитизации алмазов.

Имеется также инструмент на металлических связках, который изготавливается различными электрохимическими методами. Закрепление алмазных зерен в данном случае не требует применения сложных, дорогостоящих пресс-форм и позволяет изготавливать алмазно-абразивный инструмент со сложным фасонным профилем.

Одной из наиболее важных характеристик алмазного абразивного инструмента, определяющих его режущую способность, производительность, срок службы и стоимость, является концентрация алмаза, т. е. содержание алмаза в единице объема алмазонасного слоя. За 100%-ю концентрацию условно принято содержание алмаза в количестве 4,4 карата в 1 см³ алмазонасного слоя или 0,88 мг/мм³, 0,88 г/см³ (1 кар. = 0,2 г). Приняв плотность алмазов равной 3,52 г/см³, определим объем, который занимают алмазы в 1 см³:

$$V = \frac{0,88}{3,52} = 0,25 \text{ см}^3.$$

Следовательно, независимо от вида связки (органическая, керамическая, металлическая) при 100%-й концентрации алмазные зерна в алмазном слое занимают 25 % по объему.

7.5. Типовые формы алмазно-абразивных кругов и их выбор

Для различных видов обработки используется большое количество различных форм и размеров кругов. Основные из них приведены на рис. 7.2.

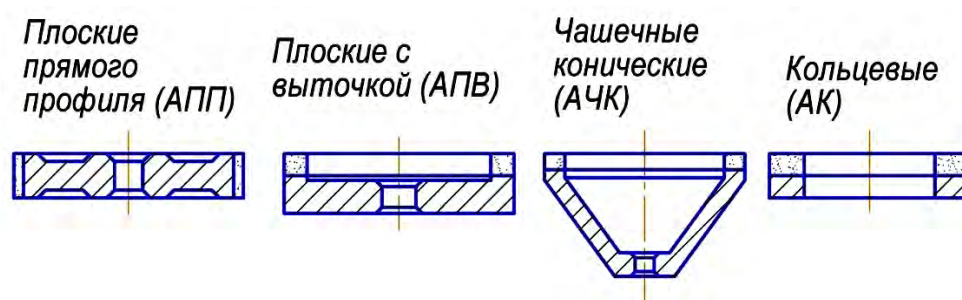


Рис. 7.2. Типы алмазного инструмента

Применительно к конкретным условиям использования инструмента выбирают его форму и размеры, вид рабочей поверхности, марку и зернистость алмазного порошка, марку связки, концентрацию алмаза. Исходными данными для выбора характеристик инструмента являются:

- форма, размеры детали и обрабатываемой поверхности;
- материал обрабатываемой детали;
- требования к качеству и шероховатости обработанной поверхности;
- вид и метод обработки;
- конструкция и эксплуатационные характеристики станка (точность, жесткость, виброустойчивость);
- режимы обработки и производительность;
- условия обработки (охлаждение, степень механизации и автоматизации);
- исходная шероховатость поверхности;
- величина снимаемого припуска.

При этом необходимо учитывать технологические возможности изготовления проектируемого инструмента с требуемыми его характеристиками.

Выбор размеров инструмента определяется эксплуатационными и технологическими факторами. Эксплуатационными факторами являются размеры обрабатываемого изделия и его характеристика, конструкция и мощность станка. Технологические факторы (прессуемость алмазоносной шихты на определенной связке, размеры и мощность технологического оборудования для изготовления шихты) определяют минимальный и максимальный размеры алмазоносного слоя. Как правило, следует стремиться к использованию инструмента с максимально допустимыми по условиям обработки размерами алмазоносного слоя. Это обеспечивает меньшие затраты

на инструмент, так как удельная стоимость (общая стоимость изготовления, отнесенная к одному карату) с увеличением количества алмазов в алмазоносном слое уменьшается.

У кольцевых кругов (АК) для обработки выпуклых или вогнутых сферических поверхностей наружный D и внутренний d диаметры определяются исходя из диаметра обрабатываемой поверхности с таким расчетом, чтобы наружная кромка инструмента перекрывала центр заготовки и несколько выходила за ее край для обеспечения свободного выхода СОЖ и продуктов срабатывания (рис. 7.3).

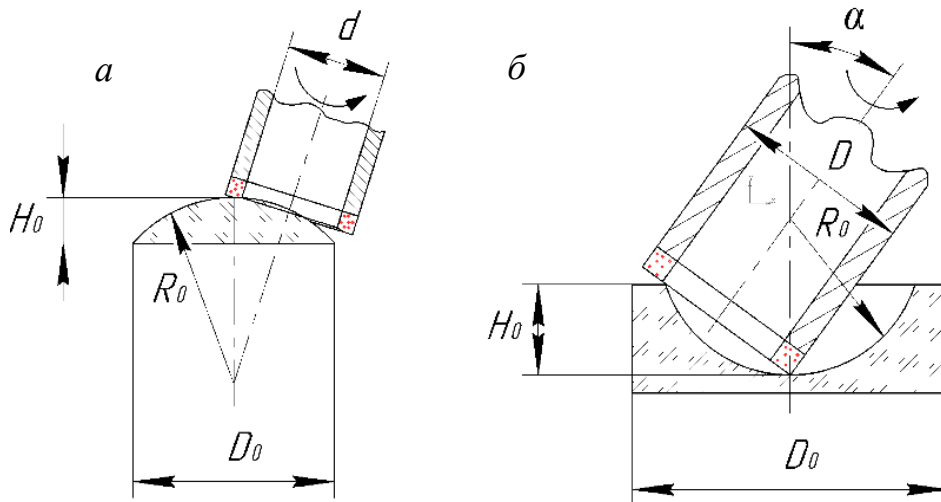


Рис. 7.3. Выбор трубчатого инструмента для обработки сферической поверхности

Расчет ведется в следующем порядке. При обработке выпуклой поверхности внутренний расчетный диаметр инструмента

$$d = KD_0.$$

При обработке вогнутой поверхности наружный расчетный диаметр инструмента

$$D = KD_0.$$

Коэффициент K выбирают в зависимости от относительной высоты H_0 / R_0 обрабатываемой поверхности:

при $H_0 / R_0 = 0,8 - 1$ $K = 0,8$;

$H_0 / R_0 = 0,6 - 0,8$ $K = 0,7$;

$H_0 / R_0 = 0,5$ $K = 0,6$.

Полученное расчетное значение D и d округляют до целого по нормальному ряду предпочтительных чисел согласно ГОСТ 6636-69.

7.6. Расчет алмазного абразивного инструмента на металлической связке

Для изготовления алмазного инструмента необходимо знать весовые содержания алмаза в алмазоносном слое и компонентов шихты этого слоя.

Расчет весового содержания A алмазов в инструменте выполняют по формуле

$$A = \frac{4,4}{100}VK, \text{ кар},$$

где 4,4 – содержание алмазов (в каратах) в 1 см^3 алмазоносного слоя при 100%-й концентрации;

V – объем алмазоносного слоя;

K – концентрация алмазов в алмазоносном слое, %.

Масса шихты $G_{\text{св}}$ металлической связки для изготовления алмазоносного слоя, объем V которого известен, с учетом технологических потерь при смешивании и засыпке шихты алмазоносного слоя в полость пресс-формы рассчитывается по формуле

$$G_{\text{св}} = V \left(1 - 0,25 \frac{K}{100} \right) \gamma_{\text{св}} K_{\text{п}}, \quad (7.1)$$

где $\gamma_{\text{св}}$ – плотность связки, $\text{г}/\text{см}^3$;

$K_{\text{п}}$ – коэффициент потерь.

Формулу для определения $\gamma_{\text{св}}$ можно получить, исходя из следующих соображений. Если взять 100 г связки, состоящей из n компонентов, то масса каждого из них численно будет соответствовать величине процентного содержания. Объем, занимаемый каждым компонентом, составит g_i / γ_i (g_i – содержание по массе i -го компонента, %; γ_i – плотность этого компонента, $\text{г}/\text{см}^3$), а сумма этих величин $\sum_{i=1}^n g_i / \gamma_i$ определит объем, который занимают 100 г связки. По известной массе и объему плотность

$$\gamma_{\text{св}} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n g_i / \gamma_i}. \quad (7.2)$$

Формулы (7.1) и (7.2) справедливы для любых беспористых материалов, когда соотношение компонентов задано в процентах по массе.

Пример

Определить массу компонентов шихты связки для изготовления алмазного слоя круга АПП $200 \times 10 \times 5$ на связке МІ при 100%-й концентрации.

Объем алмазного слоя круга составляет $30,6 \text{ см}^3$. Объем материала связки

$$V_{\text{св}} = V \left(1 - 0,25 \frac{K}{100}\right) = 30,6 \left(1 - \frac{0,25 \cdot 100}{100}\right) = 30,6 \cdot 0,75 = 23 \text{ см}^3.$$

По известным значениям плотности меди $8,94 \text{ г/см}^3$ и олова $7,3 \text{ г/см}^3$ и процентному содержанию их в связке МІ (80 и 20 % соответственно) определяем плотность связки:

$$\gamma_{\text{св}} = \frac{100}{\sum_{i=1}^n g_i / \gamma_i} = \frac{100}{80 / 8,9 + 20 / 7,3} = 8,54 \text{ г/см}^3.$$

Для изготовления алмазного слоя круга при коэффициенте потерь $K_{\text{п}} = 1,1$ требуемое количество связки

$$G_{\text{св}} = V_{\text{св}} \gamma_{\text{св}} K_{\text{п}} = 23 \cdot 8,54 \cdot 1,1 = 216,1 \text{ г.}$$

Количество меди для приготовления шихты

$$G_{\text{м}} = G_{\text{св}} \frac{g_{\text{м}}}{100} = 216,1 \cdot \frac{80}{100} = 172,88 \text{ г.}$$

Количество олова

$$G_{\text{о}} = G_{\text{св}} \frac{g_{\text{о}}}{100} = 216,1 \cdot \frac{20}{100} = 43,22 \text{ г.}$$

Количество алмазов в инструменте будет

$$A = \frac{4,4}{100} \cdot VK = \frac{4,4}{100} \cdot 30,6 \cdot 100 = 134,6 \text{ кар.}$$

7.7. Изготовление алмазного абразивного инструмента

Независимо от вида применяемой связки процесс изготовления алмазного инструмента состоит из следующих отдельных стадий:

изготовление пресс-формы;
подготовка корпуса инструмента;
изготовление алмазоносного слоя и соединение его с корпусом.

Изготовление пресс-форм и корпусов для алмазного инструмента, материалом для которых служат металлы, обычно производят методами токарной обработки с последующим шлифованием и доводкой. Наиболее распространенным способом изготовления алмазоносного слоя для всех видов связки является прессование с последующей термической обработкой. Соединение алмазоносного слоя с корпусом производят как непосредственно в процессе его изготовления, так и путем приклеивания или припаивания.

После подготовки навесок порошка алмаза и компонентов, входящих в состав связки, производят их смешивание до получения однородной массы. Считается более целесообразным сначала смешивать компоненты связки, а потом получать смесь связки с алмазным порошком. Однако часто смешивание всех составляющих шихты производят одновременно. Однородность шихты после смешивания является основным условием обеспечения равномерности распределения зерен алмазного порошка в алмазоносном слое инструмента. Поэтому процесс смешивания требует весьма тщательного выполнения, так как из-за разности плотностей компонентов их смесь легко расслаивается. Смешивание производят в барабанных смесителях. Продолжительность смешивания при больших объемах шихты может достигать до 48 ч. Смешивание порошков производят в увлажненном состоянии, так как при этом достигается лучшее сцепление частиц материалов, разнородных по своей плотности, и снижение возможности их расслоения. В качестве увлажнителей применяют 20%-й раствор глицерина в спирте, а также бензин, веретенное или вазелиновое масла.

Для получения алмазоносного слоя, достаточно однородного и без дефектов, существенное значение имеет равномерное распределение шихты в рабочем пространстве пресс-формы. Поэтому при загрузке шихты в пресс-форму производят тщательное ее разравнивание по всему объему.

После загрузки шихты в пресс-форму выполняют холодное прессование (брикетирование). В зависимости от принятого способа соединения рабочей части инструмента с корпусом брикетирование осуществляют при корпусе, помещенном в пресс-форме, или без него. Эту операцию совершают при комнатной температуре и давлении, величина которого определяется в зависимости от состава связки (для кругов на металлических связках применяют давление 196–294 Па, т. е. 2000–3000 кг/см²).

После брикетирования полученное достаточно плотное и прочное, но еще пористое изделие извлекают из пресс-формы брикетницы и помещают в пресс-форму для спекания и уплотнения. Поверхности пресс-формы смазывают коллоидно-графитовым препаратом, который предотвращает припекание к ней связки. При спекании за счет образования расплавов отдельных компонентов связки, их рекристаллизации, процессов диффузии, а также в результате последующего уплотнения массы в горячем состоянии

снижается пористость и повышается прочность спрессованного брикета. Спекание происходит при температурах 600–1200 °С, которые зависят от температур плавления компонентов, входящих в состав связки. После брикетирования оставляют некоторый запас хода пуансона для возможности уплотнения прессуемого слоя путем горячего подпрессовывания при спекании. Уплотнение производят после выдержки при заданной температуре спекания, охлаждения до температуры 500–600 °С и при давлении, составляющем 50 % давления, принятого для брикетирования. По окончании медленного охлаждения вместе с пресс-формой готовый инструмент извлекают из нее.

Поскольку опрессованная рабочая поверхность алмазноносного слоя получается гладкой ввиду того, что зерна алмаза располагаются на одном уровне со связкой, необходимо обнажить зерна, чтобы их части, выступающие из связки, могли производить работу разрушения поверхности обрабатываемого материала. Для этого производят вскрытие зерен, находящихся на поверхности алмазноносного слоя, посредством удаления связки шлифованием свободным абразивным порошком, абразивным бруском или ее поверхностного растворения азотной или соляной кислотой или их смесью – царской водкой.

После вскрытия и проверки алмазноносного слоя производят балансировку круга, которая необходима для обеспечения его устойчивости в процессе работы и отсутствия биений, вызывающих вибрации. Балансировка выполняется при помощи специальных приспособлений и приборов, которые позволяют определять положения и величины дисбаланса. Для устранения дисбаланса производят уравнивание круга путем удаления необходимого количества материала по весу на участках, создающих нарушение равновесия.

Глава 8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

8.1. Станки для тонкого алмазного шлифования и полирования

Конструкция станков для выполнения операций тонкого алмазного шлифования предусматривает возможность обработки плоских и сферических поверхностей алмазным притиром соответствующей формы. Поэтому кинематика такого оборудования в основном сохранила схему оптических шлифовально-полировальных станков с колебательным движением верхнего звена и вращением нижнего. Однако в связи с требованиями процесса алмазной обработки оно отличается от этих станков наличием принудительного вращения изделия, повышенного усилия прижима верхнего звена к нижнему, значительно увеличенной скоростью вращения шпинделя инструмента и автоматизацией рабочего цикла. В связи с этим общей схеме данных станков характерно применение гидравлических или пневматиче-

ских устройств, что усложняет их конструкцию по сравнению с технологическим оборудованием обычного типа и повышает требования к точности изготовления механизмов и узлов.

Технические характеристики отечественных станков для тонкого шлифования алмазным притиром приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Станки для тонкого шлифования притиром

Технические данные	Модель станка					
	СТША-200	СТША-400П	2ША-40	2Ш-100	3ША-20	П-20
Диаметр изделия, мм	50–240	до 350	15–45	40–120	5–20	2–20
Радиусы поверхностей изделия, мм	80–135		10–25	70–100	2,5–14	2,5–14
Частота вращения шпинделя инструмента, об/мин	900; 1400; 2800	400; 600		2500; 4000	1500; 3000	50–1200
Частота вращения шпинделя изделия, об/мин	–	–	–	–	–	–
Частота качания поводков, двойных ходов в минуту	20; 35; 60	15; 20; 26	42; 67	15; 24	75	30–100
Мощность двигателя привода шпинделей, кВт	5,4	7,0		0,75	0,45	0,09

Станок модели СТША-200 предназначен для шлифования сферических выпуклых и вогнутых поверхностей. Изделие или инструмент крепятся на верхнем шпинделе, располагающемся в качающейся головке, которая может совершать колебательное движение по дуге вокруг центра кривизны обрабатываемой поверхности. Алмазный сферический притир, как правило, укрепляется на нижнем шпинделе станка, но в необходимых случаях может располагаться также и сверху.

На станке модели СТША-400П алмазная шлифовальная планшайба располагается на нижнем шпинделе, а обрабатываемое изделие находится сверху и под действием сжатого воздуха через поводок прижимается к поверхности инструмента. Во время рабочего цикла происходят вращение инструмента, вращение изделия под действием сил трения, колебание поводка с заданной частотой и постепенное опускание последнего по мере съема материала с поверхности обрабатываемого изделия.

Станок модели 2ША-63 представляет собой объединение двух рабочих агрегатов, каждый из которых может быть настроен независимо от другого. Оба агрегата состоят из нижнего шпинделя, несущего инструмент, и верхней головки для изделия, совершающей колебательное движение, передающей нагрузку на изделие и сообщаящей ему принудительное вращение. Прижим изделия к инструменту осуществляется при помощи сжатого воздуха.

Полуавтоматы 2ША-40 и 2ША-100 предназначены для шлифования заготовок или блоков малых размеров с кривизной до полусферы. Станки включают в себя два независимых рабочих агрегата с вращающимся нижним шпинделем и качающимся верхним. Изделие вращается за счет трения об инструмент. Рабочий цикл – автоматический и осуществляется путем гидравлического и пневматического управления. Станки могут использоваться в механизированной поточной линии.

Станок-полуавтомат модели А-2507 применяется для тонкого алмазного шлифования сферических блоков притиром в виде кольца с уширенной рабочей поверхностью. Станок состоит из двух рабочих агрегатов, управляемых самостоятельно. В состав агрегата входят нижний шпиндель для крепления заготовки и верхняя головка со шпинделем инструмента. Поскольку последний представляет собой кольцо, он всегда располагается сверху. Ось поворота верхней головки, вокруг которой происходит ее качание, совпадает с центром кривизны обрабатываемой поверхности.

В настоящее время широкое применение находят станки моделей ЗША-20 и П-20, первый из которых предназначен для тонкого алмазного шлифования деталей со сферическими поверхностями, а второй – для их полирования. Обработка в обоих случаях производится по методу свободного притирания. Станки имеют две основные кинематические цепи: цепь привода вращения шпинделей изделия и цепь привода качания поводков механизма давления.

8.2. Особенности точного формообразования плоских и сферических поверхностей алмазным инструментом

Тонкое шлифование алмазным инструментом обеспечивает получение точных поверхностей, подготовленных к полированию, и поэтому характеризующихся шероховатостью с параметрами высоких классов. Отличительной чертой процесса обработки с применением тонкого алмазного шлифования (ТАШ) является возможность ограничиться двумя переходами шлифования – грубого и тонкого – и получение поверхностей с шероховатостью на один–три класса выше по сравнению с обычным шлифованием. Эти преимущества позволяют значительно сократить продолжительность технологического цикла обработки деталей.

К инструменту для ТАШ предъявляются высокие требования по чистоте и однородности алмазных и металлических (или других) порошков, образующих алмазоносный слой. Поэтому изготовление такого инстру-

мента следует проводить в условиях особой чистоты при использовании специально выделенных для этой цели оборудования, приспособлений, прессформ и т. д. во избежание попадания в алмазоносный слой посторонних крупных и твердых частиц, а также различного рода загрязнений. Общие характеристики алмазоносного слоя инструмента для тонкого шлифования отличаются тем, что при его изготовлении применяются микропорошки из синтетических алмазов, зернистость которых зависит от обрабатываемого материала. В частности, для доводки деталей из твердых сплавов, стекла и кремния используют алмазные микропорошки с размерами зерен 60/40–5/3, 28/20–10/7 и 2/1–1/0 соответственно.

Применяются два вида алмазного инструмента: кольцевой и притиры сферические и плоские. Первый находит применение в основном для шлифования поверхностей низкой, а второй – средней точности и выше.

Формообразование сферической поверхности при обработке узким кольцевым инструментом реализуется на станках без осцилляции верхнего звена и происходит за счет геометрических параметров процесса. При такой обработке явление взаимного притира поверхностей инструмента и детали играет незначительную роль. Поэтому для обеспечения требуемой точности обработки необходима соответствующая точность и жесткость звеньев станка, которые обычно недостаточно высоки. В связи с этим стандартные кольцевые круги используют только для тонкого шлифования поверхностей низкой точности с отклонениями по кривизне не менее 10–12 интерференционных колец. Для получения поверхностей более высокой точности (пять–восемь интерференционных колец) применяют кольцевой инструмент с уширенной рабочей поверхностью (до 0,2–0,25 его диаметра). Алмазоносный слой такого инструмента может быть выполнен в виде сплошного заданной сферической формы или сборного из элементов в виде цилиндрических таблеток. Кольцевой алмазный инструмент с уширенной рабочей кромкой можно применять не только на станках без осцилляции верхнего звена, но и на обычных шлифовальных станках с возвратно-качательным перемещением инструмента относительно заготовки, или наоборот.

Алмазный притир для тонкого шлифования представляет собой инструмент с плоской или сферической формой рабочей поверхности, образованной алмазоносным слоем. Расчет и проектирование алмазных притиров заключается в установлении их общих размеров и формы в соответствии с обрабатываемым изделием, определении размеров, количества алмазных элементов и схемы их распределения на рабочей поверхности инструмента.

При расчете плоского притира его общие размеры устанавливаются как в случае обычного шлифовальника-планшайбы. Для предварительного определения числа концентрических рядов на корпусе и количества алмазоносных таблеток на нем можно использовать методику расчета плоских блоков из круглых оптических заготовок. Полученное в результате такого расчета количество таблеток для изготовления инструмента уточняют с учетом коэффициента заполнения поверхности инструмента. Этот коэф-

коэффициент представляет собой отношение суммарной площади всех таблеток к площади корпуса инструмента. Его оптимальное значение находится в пределах 0,2–0,3. Таблетки распределяют пропорционально по рядам, количество которых принимается в соответствии с предварительным расчетом. Затем это количество уточняется исходя из схемы обработки: при расположении инструмента на шпинделе станка с целью улучшения равномерности его изнашивания плотность распределения таблеток в крайних рядах инструмента следует несколько увеличивать по сравнению с плотностью в средних. Основные размеры таблеток, применение которых на основании опыта наиболее удобно, приведены в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Размеры алмазных цилиндрических таблеток

Диаметр, мм	Высота, мм
5,0	3,0
8,0	4,0
10,0	6,0
15,0	6,0
20,0	8,0

Для расчета сферических притиров из цилиндрических алмазных таблеток можно использовать методы, применяемые при определении размеров блокировочного инструмента, но с учетом особенностей характера распределения и способа закрепления их на корпусе. Существуют методика специального расчета сферического алмазного инструмента с применением цилиндрических алмазных таблеток и способ его изготовления. Краткое содержание этой методики заключается в следующем. Первоначально определяются размеры и радиусы кривизны корпуса для крепления таблеток в соответствии с их размерами и параметрами обрабатываемой поверхности. Затем, исходя из необходимости сохранения постоянства радиуса кривизны инструмента и учета неизбежной при этом неравномерности изнашивания алмазоносного слоя, производится расчет таблеток и устанавливается система их распределения по поверхности притира.

После определения вспомогательных геометрических параметров инструмента рассчитываются размеры концентрических окружностей для расположения таблеток, углы между ними и необходимое количество таблеток по рядам. Для обработки инструментом большой кривизны рекомендуется выбирать алмазные таблетки меньших диаметров. Кроме того, при их распределении на корпусе необходимо учитывать коэффициент заполне-

ния, который для инструментов с $H_0/R_0 < 0,3$ может иметь значения от 0,35 до 0,40, а для инструментов с $H_0/R_0 > 0,3$ – от 0,45 до 0,50, где H_0 и R_0 – соответственно высота и радиус притира.

После сборки поверхность как плоских, так и сферических притиров шлифуют абразивным порошком на соответствующем металлическом инструменте до вскрытия алмазного слоя и сообщения обрабатываемой поверхности требуемой точности.

Тонкое шлифование сферических поверхностей алмазным кольцевым инструментом проводят на станках моделей «Алмаз», АЛ и АШС. При выборе режима обработки назначают окружные скорости инструмента порядка 20–35 м/с при вращении обрабатываемого изделия с частотой 52–105 с⁻¹.

Шлифование алмазными притирами производят на станках специальной конструкции, обеспечивающих получение повышенных скоростей вращения инструмента и высоких рабочих нагрузок. На данных станках тонкое шлифование поверхностей заготовок или блоков проходит при окружных скоростях инструмента от 8 до 20 м/с и давлениях порядка 15–20 кН/м (150–200 г/см²).

Полирование деталей алмазным инструментом представляет собой новый процесс, пока не получивший широкого распространения. Внедрение алмазного полирования сдерживается появлением волосяных царапин на обрабатываемой поверхности, что объясняется образованием в процессе смешивания алмазной шихты инструмента конгломерата алмазных зерен субмикрочастиц, наносящих риски. Кроме того, качество данного метода полирования во многом определяется связкой алмазного инструмента. Поэтому в настоящее время заключительную операцию обработки проводят традиционными полировальниками, в частности пенополиуретановыми. Для придания последним требуемой точности используют так называемые правильники, которые представляют собой тот же алмазный инструмент, но с несколько другим радиусом кривизны рабочей поверхности. Этими правильниками периодически шлифуют упомянутые полировальники, сообщая им первоначальную форму. Обработка по такой схеме имеет определенные недостатки, среди которых наиболее существенными являются потеря рабочего времени на исправление формы полировальника и возможность внедрения в его подложку отработанных зерен алмазного порошка и связки, которые впоследствии могут явиться источником царапин на детали. В связи с этим более перспективной является обработка с применением приемов управления процессом формообразования с использованием геометрических, кинематических и силовых параметров технологического оборудования. Создание и внедрение такой технологии, а в некоторых случаях и соответствующих станков, позволит назначать наиболее выгодные режимы обработки и во многом автоматизировать процесс получения прецизионных деталей машин и приборов, что повысит их качество и улучшит экономические показатели производства.

8.3. Станки для шлифования и полирования свободным абразивом и полирующей суспензией

Данный тип технологического оборудования широко используется в оптико-механической промышленности при изготовлении оптических деталей с прецизионными плоскими и сферическими поверхностями методом свободного притирания и может найти применение также в электронной и металлообрабатывающей промышленности для формообразования соответствующих деталей (например, пластин из полупроводниковых материалов, направляющих или других деталей из металлов с высокими требованиями к неплоскостности и точными углами). Характерной особенностью обсуждаемых станков является их сравнительно несложная конструкция, простота наладки и эксплуатации, высокая надежность в работе и универсальность, заключающаяся в возможности обработки как плоских, так и сферических поверхностей на одном и том же станке.

Существующие шлифовально-полировальные станки можно разделить на три группы:

- 1) станки с пневматическим давлением;
- 2) станки с ременной передачей движения на вал кривошипа (поводок);
- 3) станки с фрикционной передачей.

Шлифовально-полировальные станки обозначаются условным шифром, состоящим из буквенного и цифрового индексов, первый из которых указывает технологическое назначение станка (ШП – шлифовально-полировальный, ПТ – для тонкого полирования, ПД – полировально-доводочный), а второй – максимальный диаметр детали или блока, обрабатываемых на данном оборудовании. У станков с шифром ШП диаметр детали указывается в миллиметрах, а с шифром ПТ – в сантиметрах. Дополнительно добавляют цифровой индекс, показывающий количество шпинделей на станке, и буквенный, характеризующий конструктивные особенности станка.

В настоящее время наибольшее распространение получили станки с пневматическим давлением, которые характеризуются высокой производительностью и удобством в эксплуатации. Отличительной конструктивной особенностью этих станков является наличие механизма давления, обеспечивающего безынерционную регулируемую силу нажатия на поводок. Подача абразивной и полирующей суспензии в зону обработки осуществляется посредством циркуляционного питателя. Основные сведения о станках данного типа приведены в табл. 8.3. Конструкция этих станков унифицирована.

**Станки для шлифования и полирования свободным абразивом
и полирующей суспензией**

Технические данные	Модель станка							
	6ШП-20	6Ш-100М	6ШП-200А	3ШП-320	6ПД-100М	4ПД-200А	3ПД-320А	ПД-500А
Диаметр изделия, мм	5–20	50–100	100–200	200–320	25–100	100–200	200–320	300–500
Количество шпинделей	6	6	6	3	6	4	3	1
Частота вращения шпинделя инструмента, об/мин	250–1200	90–360	45–800	30–180	10–100	3,5–100	2,5–100	1–30
Частота качания поводков, двойных ходов в минуту	20–100	40–100	19–84	28–100	7–70	3,5–100	2,5–100	1–50
Усилие прижима изделия, кгс	0,1–4,0	1,5–30	3–80	25–125	0,25–10	5–30	3–10	3–100
Мощность двигателя привода шпинделей, кВт	1,02	3,55	6,85	8,85	0,18	2,51	6,27	2,27
Точность обработки	Высокая	Средняя	Средняя	Средняя	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая

Глава 9. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

9.1. Обработка по методу свободного притирания

9.1.1. Сущность метода

Сущность метода заключается в том, что две поверхности при взаимном притирании самоисправляются и приобретают правильную геометрическую форму одинаковой кривизны: либо сферическую (одна – выпуклая, другая – вогнутая), либо плоскую. Причем на стадии шлифования заготовка притирается к обрабатывающей поверхности твердого шлифовальника, а при полировании мягкие подложки полировальника притираются к шлифованной поверхности заготовки стекла.

Обработка деталей методом притирания обеспечивает максимальную точность по сравнению с другими методами. Этот способ является весьма старым и получил название классического.

Метод свободного притирания определяется наличием нескольких признаков:

1. Контакт притирающихся поверхностей инструмента и заготовки обеспечивается силовым замыканием.
2. Одна из притирающихся поверхностей самоустанавливается на другой благодаря наличию шарового шарнира.
3. Наладочные параметры станка выбирают так, чтобы все точки на притирающихся поверхностях инструмента и детали находились в многократном аперриодическом контакте.

Свободным притиранием можно получать весьма точные поверхности на грубом оборудовании и грубым инструментом.

9.1.2. Прогрессивное технологическое оборудование для одновременной двусторонней обработки линз с тонким центром

При формообразовании высокоточных линз по классической технологии односторонней обработки заготовки деталей закрепляют (блокируют) на приспособление наклейным веществом (в большинстве случаев наклейной смолой), которое поочередно наносят на каждую из исполнительных поверхностей.

Недостатком такого метода крепления является деформация деталей с тонким центром (двояковогнутые и плосковогнутые линзы и отрицательный мениск). Эта деформация обусловлена тем, что блокировка сопровождается нагревом заготовки и наклейного вещества, которые при остывании из-за различных значений ТКЛР сокращаются на разную величину. В результате заготовка в блоке находится в напряженном (упругодеформированном) состоянии. И если ее точно обработать, а затем удалить наклейное вещество, то упругая деформация стекла снимается, вызывая изменение той точности, которая была достигнута на заблокированной детали, т. е. возникает погрешность формы обработанной поверхности.

На практике отмеченную погрешность уменьшают так называемой разгрузкой линзы, при которой в центральную зону заготовки помещают бумажную прокладку небольшого диаметра. При этом исключается адгезия (прилипание) смолы к стеклу в центральной зоне заготовки, что способствует уменьшению деформации последней, однако это происходит не всегда, особенно в случае линз с малой относительной толщиной (0,05 и меньше).

Перечисленных недостатков можно избежать при одновременной двусторонней обработке линз. В таком случае на исполнительные поверхности деталей наносить наклейное вещество не требуется, что исключает деформацию заготовки.

Двусторонняя обработка линз с тонким центром может быть реализована на технологическом оборудовании, представляющем собой модернизированный шлифовально-полировальный или полировально-доводочный станок модели ШП (ПД).

Принципиальная схема станка для одновременной двусторонней обработки отрицательных линз, диаметр которых не превышает $1,6 R$, где R – радиус кривизны обрабатываемой поверхности, представлена на рис. 9.1.

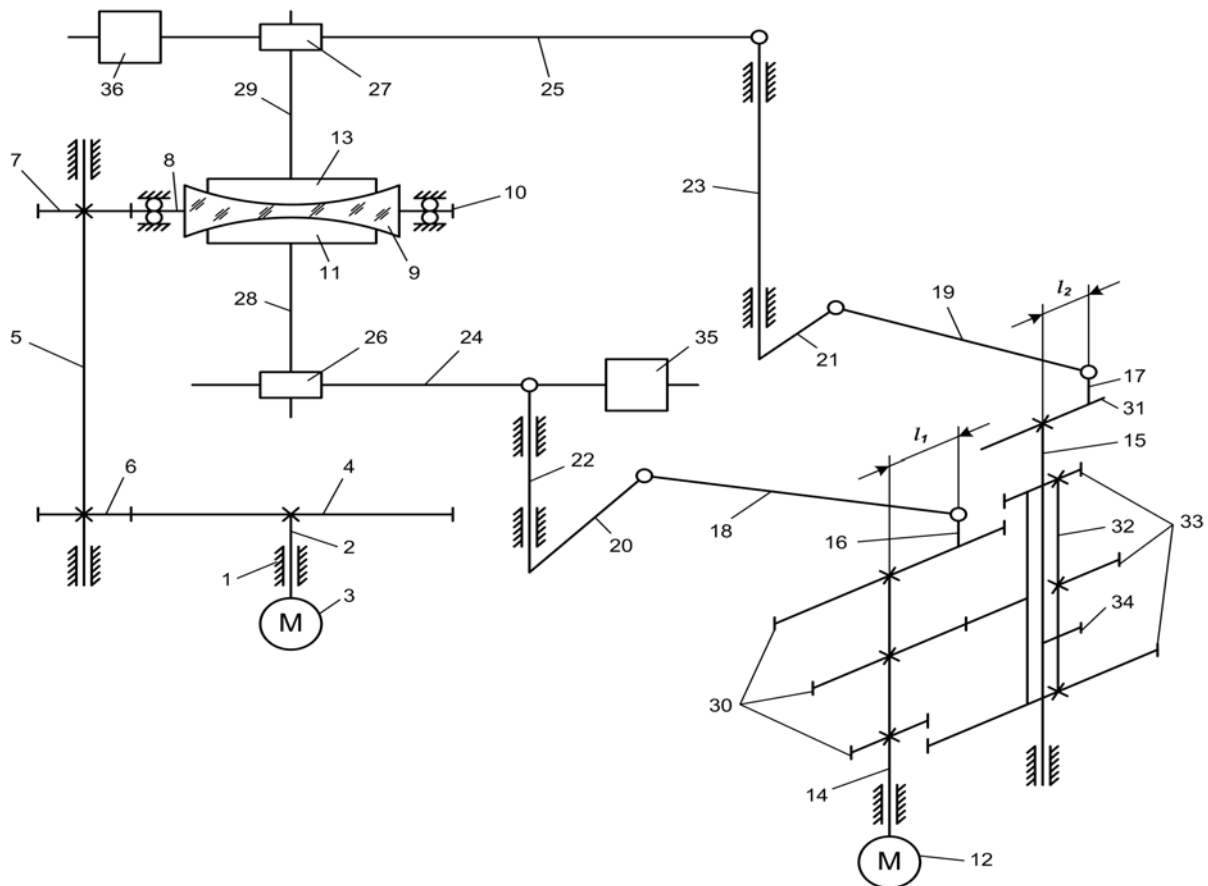


Рис. 9.1. Схема станка для одновременной двусторонней обработки линз с пологими вогнутыми поверхностями

Станок состоит из основания 1 , на котором смонтированы шпиндель 2 с приводом вращения 3 , механизм привода линзы, состоящий из центрального зубчатого колеса 4 , жестко установленного на шпинделе 2 , вала 5 с ведущим 6 и ведомым 7 зубчатыми колесами, сепаратора 8 для линзы 9 и зубчатого колеса 10 , неподвижно закрепленного на сепараторе 8 , а также механизма качания инструмента 11 с приводом вращения 12 и механизма качания верхнего инструмента 13 .

Механизмы качания инструмента 11 и верхнего инструмента 13 содержат соответственно входной вал 14 и 15 , пальцы 16 и 17 , шатуны 18 и 19 , рычаги 20 и 21 , валы штанги 22 и 23 , штанги 24 и 25 с державками 26 и 27 , удерживающими поводки 28 и 29 . В механизм качания инструмента 11 входит также блок зубчатых колес 30 , неподвижно закрепленный на вход-

ном вала *14*, а в механизм качания инструмента *13* – кривошипный диск *31*, смонтированный на входном валу *15*, и полый вал *32* с блоком зубчатых колес *33* и винтом *34*, установленный с возможностью перемещения вдоль оси входного вала *15*. При этом поводки *28* и *29* шарнирно соединены с инструментами *11* и *13*, штанги *24* и *25* кинематически связаны с валами штанг *22* и *23* с возможностью качания в плоскости, проходящей через ось симметрии последних, рычаги *20* и *21* жестко закреплены на валах штанг *22* и *23*, шатуны *18* и *19* шарнирно соединены с рычагами *20* и *21* и с пальцами *16* и *17*, установленными с возможностью радиального перемещения по поверхности соответственно верхнего зубчатого колеса блока зубчатых колес *30* и кривошипного диска *31*, а зубчатое колесо *10* неподвижно соединено с сепаратором *8*.

Для сообщения рабочего усилия на линзу *9* используются грузы *35* и *36*, расположенные на штангах *24* и *25*.

Станок работает следующим образом. Линзу *9* неподвижно закрепляют в сепараторе *8*, на ее исполнительные поверхности устанавливают инструменты *11* и *13*, с последними приводят в контакт поводки *28* и *29*, грузами *35* и *36* нагружают штанги *24* и *25*, создавая необходимое рабочее усилие, и включают приводы вращения *3* и *12*. Крутящий момент от первого из них через центральное зубчатое колесо *4*, ведущее *6* и ведомое *7* зубчатые колеса, зубчатое колесо *10* и сепаратор *8* вызывает вращение линзы *9*. Благодаря наличию сил трения между линзой и инструментами последние совершают вращение вокруг собственных осей симметрии.

Крутящий момент от привода вращения *12* через входной вал *14*, верхнее зубчатое колесо блока зубчатых колес *30*, палец *16*, шатун *18*, рычаг *20*, вал штанги *22*, штангу *24* и поводок *28* вызывает возвратно-вращательное перемещение инструмента *11* по одной из исполнительных поверхностей линзы *9*. Кроме того, крутящий момент от привода вращения *12* через одно из зубчатых колес блока зубчатых колес *30*, находящегося в зацеплении с зубчатым колесом блока зубчатых колес *33*, полый вал *32*, винт *34*, входной вал *15*, кривошипный диск *31*, палец *17*, шатун *19*, рычаг *21*, вал штанги *23*, штангу *25* и поводок *29* вызывает возвратно-вращательное перемещение верхнего инструмента *13* по второй исполнительной поверхности линзы *9*.

Для управления величиной съема припуска в той или иной зоне исполнительных поверхностей линзы *9* в процессе ее обработки производят независимое регулирование следующих наладочных параметров станка: рабочего усилия посредством подбора величины грузов *35* и *36*, амплитуды возвратно-вращательных перемещений инструментов *11* и *13* по поверхностям линзы, что обеспечивается регулированием расстояний l_1 и l_2 между осями симметрии пальцев *16*, *17* и входных валов *14*, *15*, а также количества двойных ходов в минуту инструментов, что достигается изменением скорости вращения входного вала *14* и назначением зацепления той или иной пары зубчатых колес блоков зубчатых колес *30* и *33*.

По окончании процесса формообразования отключают приводы вращения 3 и 12, поводки 28 и 29 разъединяют с инструментами 11 и 13, последние снимают с поверхностей линзы 9, линзу достают из сепаратора 8, на ее место в сепаратор закрепляют новую линзу и цикл обработки повторяют.

Кинематическая схема станка для формообразования оптических деталей с вогнутыми сферическими поверхностями диаметром не менее $1,6 R$ приведена на рис. 9.2.

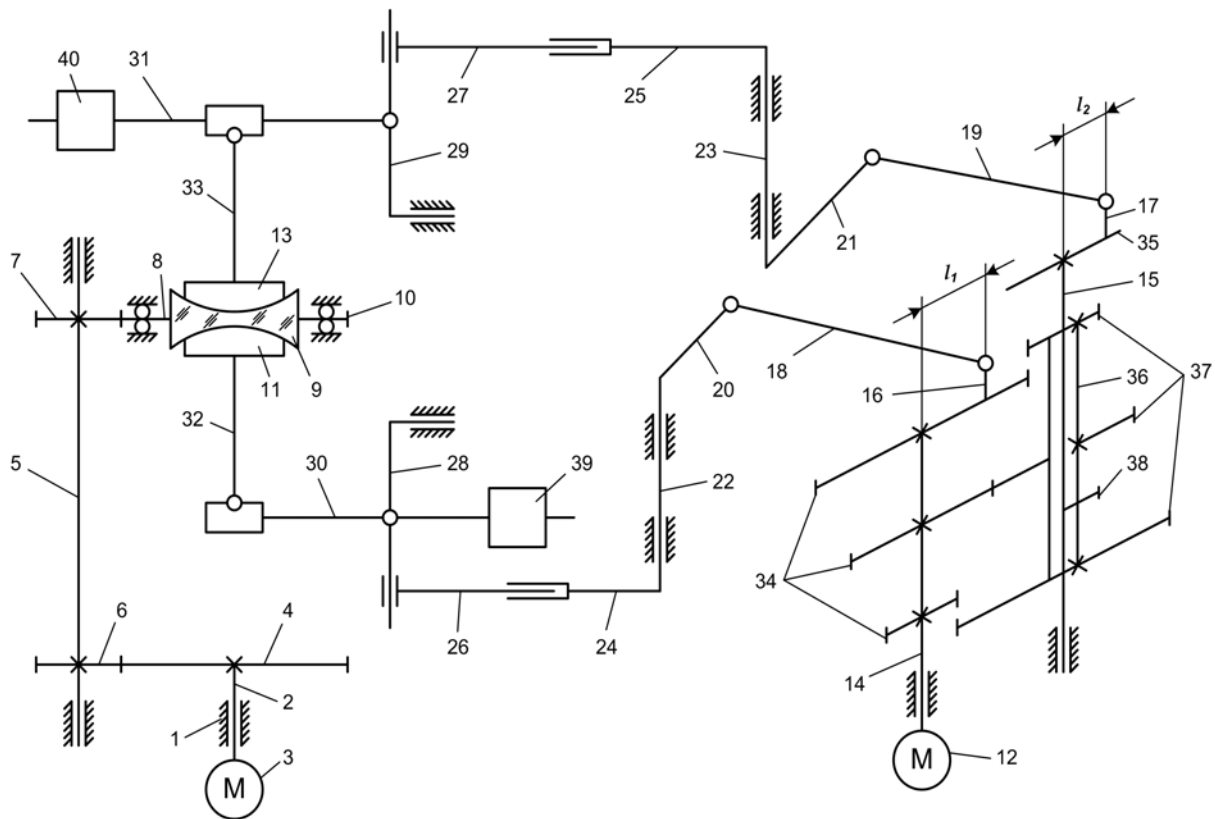


Рис. 9.2. Схема станка для одновременной двусторонней обработки линз с крутыми вогнутыми поверхностями

Станок состоит из основания 1, на котором смонтированы шпиндель 2 с приводом вращения 3, механизм привода линзы, состоящий из центрального зубчатого колеса 4, жестко установленного на шпинделе 2, вала 5 с ведущим 6 и ведомым 7 зубчатыми колесами, сепаратора 8 для линзы 9 и зубчатого колеса 10, неподвижно закрепленного на сепараторе 8, а также механизма качания инструмента 11 с приводом вращения 12 и механизма качания верхнего инструмента 13.

Механизмы качания нижнего 11 и верхнего 13 инструментов содержат соответственно входные валы 14 и 15, пальцы 16 и 17, шатуны 18 и 19, рычаги 20 и 21, валы штанги 22 и 23, штангу переменной длины, состоящую из неподвижных 24 и 25 и подвижных 26 и 27 элементов, кронштейны 28 и 29, рычаги 30 и 31, поводки 32 и 33. В механизм качания инструмента 11 входит также блок зубчатых колес 34, неподвижно закрепленный на входном

валу 14, а в механизм качания инструмента 13 – кривошипный диск 35, смонтированный на входном валу 15, и полый вал 36 с блоком зубчатых колес 37 и винтом 38, установленный с возможностью перемещения вдоль оси входного вала 15. При этом подвижные элементы 26 и 27 установлены с возможностью перемещения вдоль оси симметрии неподвижных элементов 24 и 25 и вращения вокруг этой оси, поводки 32 и 33 жестко соединены с инструментами 11 и 13 и шарнирно – с рычагами 30 и 31, неподвижные элементы 24 и 25 жестко связаны с валами штанг 22 и 23, рычаги 20 и 21 неподвижно закреплены на валах штанг 22 и 23, шатуны 18 и 19 шарнирно соединены с рычагами 20 и 21 и пальцами 16 и 17, установленными с возможностью радиального перемещения по поверхности соответственно верхнего зубчатого колеса блока зубчатых колес 34 и кривошипного диска 35, зубчатое колесо 10 неподвижно соединено с сепаратором 8, а кронштейны 28 и 29 шарнирно соединены с рычагами 30 и 31 и установлены с возможностью возвратно-вращательных движений вокруг оси, совпадающей с центром кривизны обрабатываемой поверхности линзы 9 и перемещения относительно подвижных элементов 26 и 27 штанг переменной длины.

Для сообщения рабочего усилия на линзу 9 используются грузы 39 и 40, расположенные на рычагах 30 и 31.

Станок работает следующим образом. Линзу 9 неподвижно закрепляют в сепараторе 8, на ее исполнительные поверхности устанавливают инструменты 11 и 13 с поводками 32 и 33, в контакт с последними приводят рычаги 30 и 31 и нагружают их грузами 39 и 40, создавая необходимое рабочее усилие, а затем включают приводы вращения 3 и 12. Крутящий момент от первого из них через центральное зубчатое колесо 4, ведущее 6 и ведомое 7 зубчатые колеса, зубчатое колесо 10 и сепаратор 8 вызывает вращение линзы 9. Благодаря наличию сил трения между линзой и инструментами последние совершают вращение вокруг собственных осей симметрии.

Крутящий момент от привода вращения 12 через входной вал 14, верхнее зубчатое колесо блока зубчатых колес 34, палец 16, шатун 18, рычаг 20, вал штанги 22, неподвижный 24 и подвижный 25 элементы, кронштейн 28, рычаг 30 и поводок 32 вызывает возвратно-вращательное перемещение инструмента 11 по одной из исполнительных поверхностей линзы 9. Кроме того, крутящий момент от привода вращения 12 через одно из зубчатых колес блока зубчатых колес 34, находящегося в зацеплении с зубчатым колесом блока зубчатых колес 37, полый вал 36, винт 38, входной вал 15, кривошипный диск 35, палец 17, шатун 19, рычаг 21, вал штанги 23, неподвижный 25 и подвижный 27 элементы, кронштейн 29, рычаг 31 и поводок 33 вызывает возвратно-вращательное перемещение верхнего инструмента 13 по второй исполнительной поверхности линзы 9.

Для управления величиной съема припуска в той или иной зоне исполнительных поверхностей линзы 9 в процессе ее обработки производят независимое регулирование следующих наладочных параметров станка: рабочего усилия посредством подбора величины грузов 39 и 40, амплиту-

ды возвратно-вращательных перемещений инструментов *11* и *13* по поверхностям линзы, что обеспечивается регулированием расстояний l_1 и l_2 между осями симметрии пальцев *16*, *17* и входных валов *14*, *15*, а также количества двойных ходов в минуту инструментов, что достигается изменением скорости вращения входного вала *14* и назначением зацепления той или иной пары зубчатых колес блоков зубчатых колес *34* и *37*.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что обработка высокоточных линз с радиусами кривизны от 12 до 95 мм (крутые сферические поверхности) становится менее трудоемкой и более качественной, если в процессе колебательного движения инструмента рабочее усилие направлять по нормали к исполнительной поверхности детали. Для реализации выявленной особенности в предложенной схеме станка возвратно-вращательное движение инструментов *11* и *13* организовано с помощью рычагов *30* и *31*, установленных с возможностью вращения в вертикальной плоскости вокруг центров кривизны сферических поверхностей детали *9*. При этом поводки *32* и *33* соединены с рычагами *30* и *31* шарнирно, а с инструментами – жестко. Такая конструкция рабочей зоны требует определенной длины поводков, при которых исключается раскрытие стыка в системе «заготовка–инструмент», приводящее к появлению локальной погрешности ΔN в краевой зоне детали. Проведенные экспериментальные исследования показали, что для исключения погрешности ΔN длина поводков *32* и *33* должна составлять не менее четырех значений соответствующих R .

9.1.3. Блокировка линз при одновременной двусторонней обработке

Как видно из рис. 9.3, наклейная оправка *1* с посадочным отверстием для линзы должна иметь такую конфигурацию, чтобы она свободно помещалась между продолжениями обрабатываемых поверхностей *A* и *Б* линзы *2*.

При блокировке линзу вместе с наклейной оправкой устанавливают на подставку *3* с круговой канавкой. Размеры последней должны быть такими, чтобы наклейная оправка располагалась примерно посередине боковой поверхности линзы. При этом оправку необходимо центрировать относительно оси линзы.

Подставку вместе с линзой и оправкой нагревают до температуры плавления наклейной смолы, которую в виде шариков *4* (8–10 шт.) диаметром 2–3 мм помещают в зазор между линзой и оправкой (при использовании вместо наклейной смолы гипсоцементной смеси нагрев подставки с линзой исключается). После расплавления смоляных шариков подставку с линзой и оправкой охлаждают.

Рассмотренный метод крепления линзы не вызывает ее деформации.

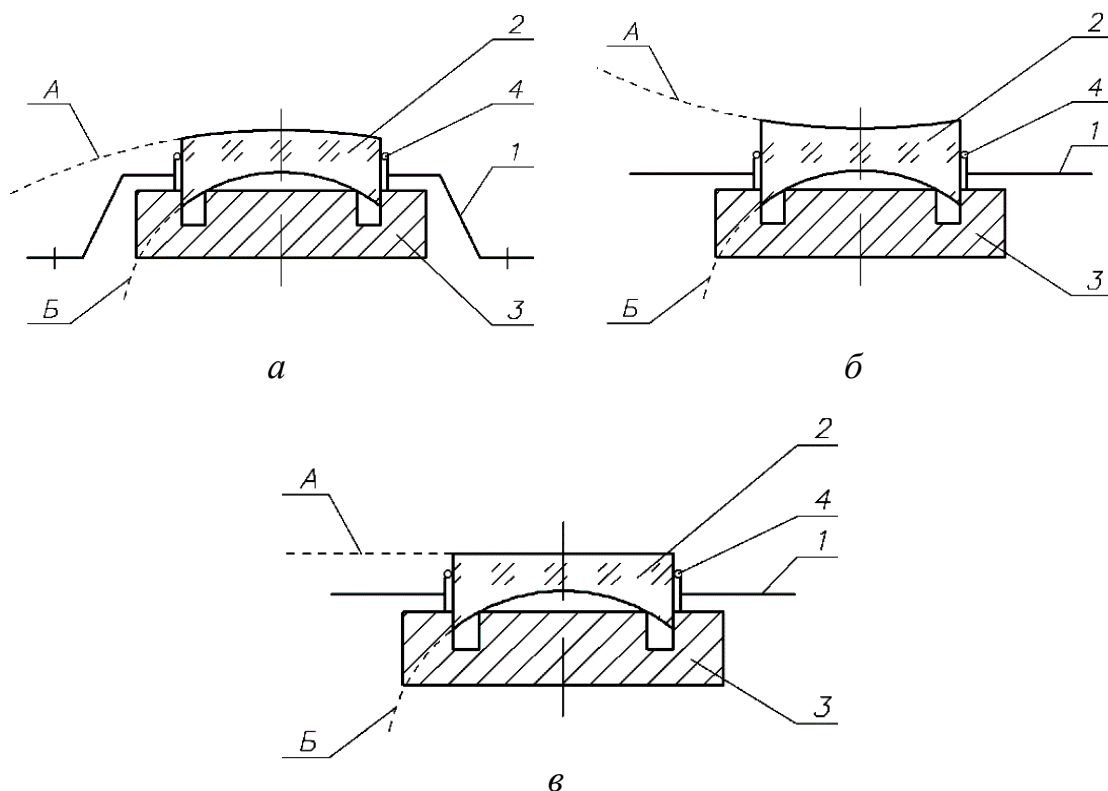


Рис. 9.3. Схема блокировки при одновременной двусторонней обработке

9.2. Обработка по методу «Синхроспид»

9.2.1. Сущность метода

Название метода «Синхроспид» относится к системе, включающей в себя специальный тип станков, инструменты и ЭВМ с программой для определения регулируемых параметров технологического оборудования и инструментов, зависящих от характеристики обрабатываемой детали.

Сущность метода «Синхроспид» состоит в том, что в процессе обработки инструмент и заготовка точно расположены по отношению друг к другу и индивидуально приведены во вращение, т. е. перемещение верхнего звена относительно нижнего отсутствует.

В методе «Синхроспид» тонкое шлифование и полирование выполняют инструментами, на корпусе которых наклеены соответственно алмазные таблетки и полировочная пленка толщиной 0,5 мм (инструменты 1 и 2 на рис. 9.4). Для настройки шлифовальника на требуемый радиус кривизны используют дополнительный наладочный инструмент 3, которым также прижимают полировочную пленку при ее наклеивании на корпус полировальника.

Правку полировальника с целью придания ему заданного радиуса производят корректирующим инструментом (правильником) с наклеенными алмазонасными таблетками (инструмент 5 на рис. 9.4). Для настройки этого правильника используют дополнительный наладочный инструмент 4.

Следовательно, для каждой поверхности линзы необходимо дополнительно использовать три вспомогательных высокоточных инструмента, доводка и правка которых осуществляются при помощи рычажных станков типа ШП опытным оптиком, выполняющим функции оптика-инструментальщика. Наладка инструментов должна проводиться с большой тщательностью, поскольку их точность в методе «Синхроспид» обеспечивает заданный уровень качества и точности оптических поверхностей (деталь копирует форму инструмента), в то время как в условиях свободного притирания данная взаимосвязь проявляется в значительно меньшей степени. Кроме того, метод «Синхроспид» может быть реализован только на прецизионном технологическом оборудовании, позволяющем точно устанавливать регулируемые параметры, что практически не требуется в методе свободной притирки.

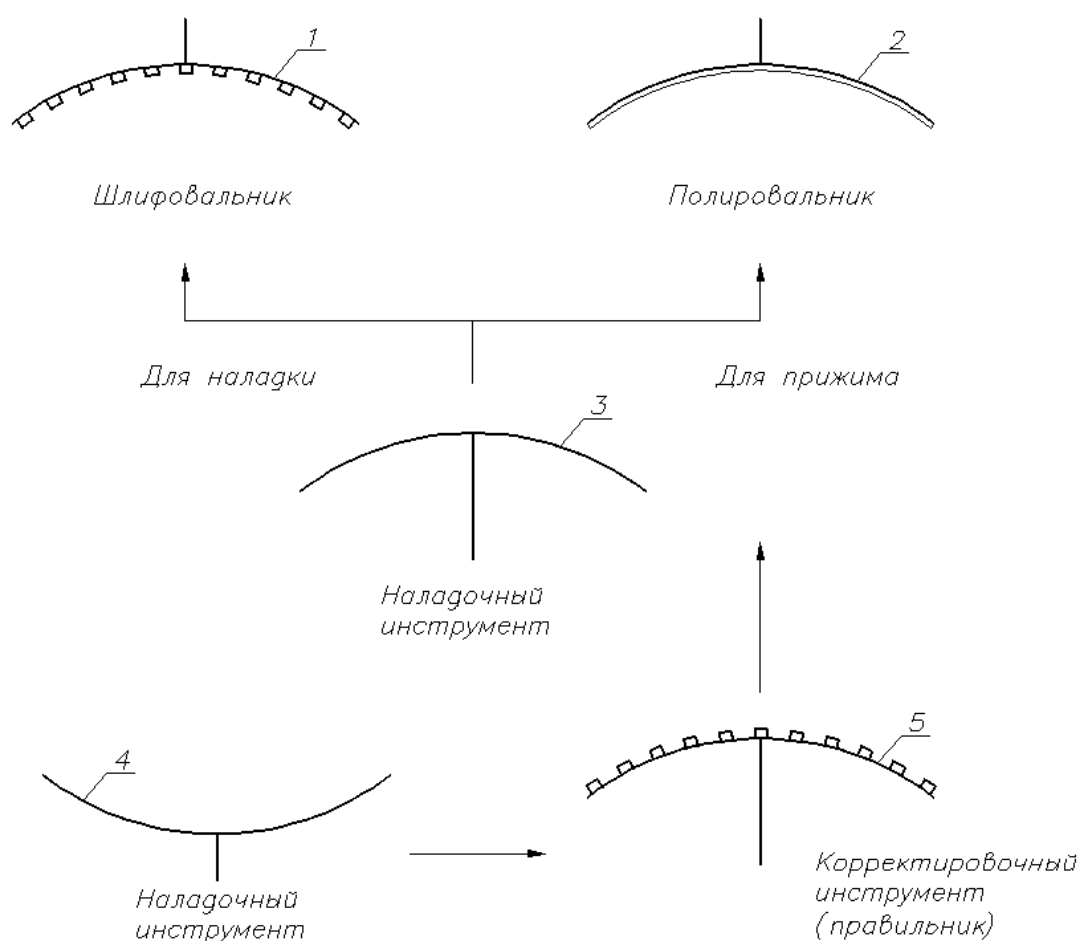


Рис. 9.4. Набор инструментов для вогнутой поверхности

9.2.2. Обработка плоских поверхностей

Рассмотрим рис. 9.5, на котором деталь 2 установлена с эксцентриситетом e относительно инструмента 1 и в процессе обработки не совершает переносного (осциллирующего) движения. При этом инструмент и деталь вращаются попутно с угловыми скоростями соответственно ω_1 и ω_2 .

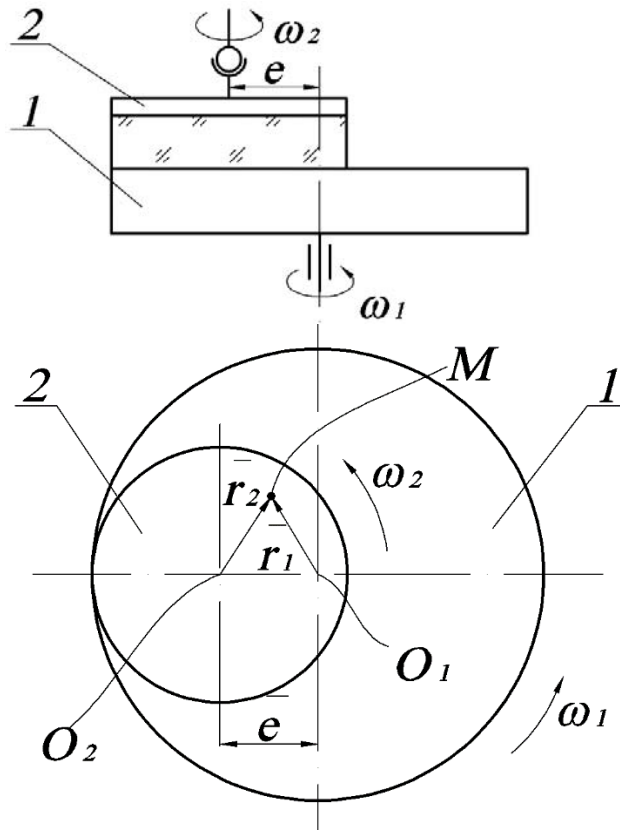


Рис. 9.5. Схема обработки плоских поверхностей по методу «Синхроспид»

На обрабатываемой поверхности выделим произвольную точку M и определим вектор скорости скольжения $\vec{V}_{ск}$:

$$\vec{V}_{ск} = \vec{V}_2 - \vec{V}_1, \quad (9.1)$$

где $\vec{V}_2 = \vec{\omega}_2 \vec{r}_2$ и $\vec{V}_1 = \vec{\omega}_1 \vec{r}_1$ – векторы линейной скорости верхнего и нижнего звеньев в рассматриваемой точке M , расположенной на расстоянии r_2 и r_1 от осей вращения детали и инструмента соответственно.

Поскольку, как видно из рис. 9.5, справедливо векторное равенство

$$\vec{r}_2 = \vec{e} + \vec{r}_1,$$

то в случае, когда $\omega_2 = \omega_1$, выражение (9.1) принимает вид

$$\vec{V}_{ск} = \vec{\omega} \vec{e},$$

где $\vec{\omega}$ – вектор угловой скорости инструмента и заготовки.

Следовательно, если инструмент и заготовка, установленные с эксцентриситетом, вращаются однонаправленно с равными скоростями, то величина скорости скольжения во всех точках на обрабатываемой поверхности будет одинаковой.

Кроме отмеченного при реализации данного метода выполняют также оптимизацию рабочей поверхности инструмента. При этом исходят из того, что активная поверхность инструмента должна иметь такую форму, чтобы ее суммарная длина на каждой из концентрических окружностей равнялась длине той части этой окружности, которая контактирует с деталью.

В качестве примера оптимизации рабочей поверхности плоского инструмента 1, на котором установлена деталь 2, рассмотрим рис. 9.6, где S_0 – площадь постоянного контакта соприкасающихся поверхностей. По условиям оптимизации форма рабочей поверхности инструмента должна быть такой, чтобы суммарная длина его активных площадок на окружности радиусом R_i , произвольно выбранной вне зоны постоянного контакта, равнялась длине дуги ABC .

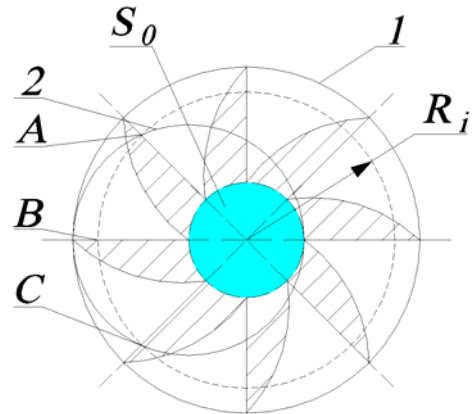


Рис. 9.6. Оптимизация рабочей поверхности плоского инструмента при обработке по методу «Синхроспид»

9.2.3. Обработка сферических поверхностей

При обработке сферических деталей по методу «Синхроспид» также необходимо добиться наиболее равномерного распределения скоростей скольжения по формируемой поверхности. Для выяснения условий, обеспечивающих это требование, рассмотрим рис. 9.7, где деталь 2 с углом раствора α установлена под углом β к оси инструмента 1.

Принимаем, что скорости скольжения в точках 3 и 4 $v_{ск3}$ и $v_{ск4}$ равны между собой. Поскольку, как видно из рис. 9.7, б):

$$v_{ск4} = R \sin(\beta - \alpha) \omega_1 + R \sin \alpha \omega_2;$$

$$v_{ск3} = R \sin(\beta + \alpha) \omega_1 - R \sin \alpha \omega_2,$$

то, приравняв эти равенства:

$$2 \sin \alpha \omega_2 = \omega_1 [\sin(\beta + \alpha) - \sin(\beta - \alpha)],$$

получим соотношение

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\sin(\beta + \alpha) - \sin(\beta - \alpha)}{2\sin\alpha},$$

из которого следует, что

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \cos\beta.$$

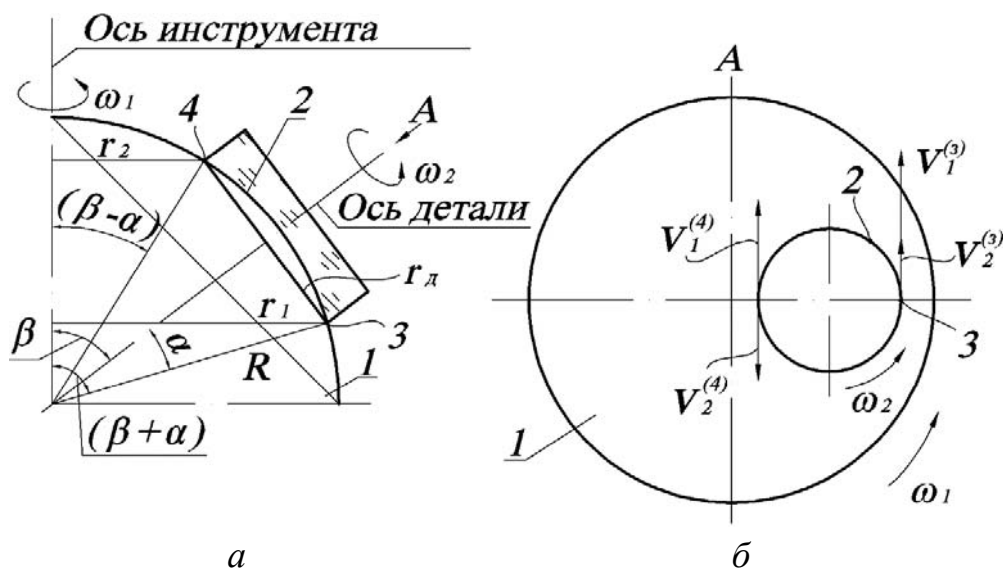


Рис. 9.7. К определению угла β

Таким образом, в случае обработки линз по методу «Синхроспид» величина угла между осями вращения заготовки и инструмента зависит от соотношения скоростей их вращения.

9.3. Магнитореологическое полирование оптических деталей

9.3.1. Сущность метода

Наиболее проблемным в технологии производства оптических деталей сложной формы является полирование и, в частности, так называемое фрагментарное полирование, основанное на зонном удалении материала. Такой процесс требует прецизионного управления скоростями вращения и перемещения инструмента относительно обрабатываемой поверхности. В настоящее время это обеспечивается станками с числовым программным управлением (ЧПУ), выполняющими движение инструмента или детали в пространстве согласно доводочным алгоритмам. Кроме управления законом движения инструмента необходимо также, чтобы последний обладал

возможностью мгновенно адаптироваться к форме обрабатываемой поверхности, а скорость съема припуска в процессе полирования была известна и стабильна во времени. Традиционные механические зонные инструменты, использующие сжатый воздух или упругие основания, поджимающие полировочную подложку к обрабатываемой поверхности, не обеспечивают требуемый уровень адаптивности и стабильности.

Поскольку жидкая среда способна легко адаптироваться к любой форме поверхности, то можно организовать обработку материалов потоком абразивной суспензии. В этих процессах энергия потока маловязкой жидкости (обычно воды) передается абразивным частицам для выполнения локального съема материала. В зависимости от параметров процесса, таких как скорость течения жидкости и размер абразивных частиц, съем материала может меняться от интенсивной резки до мягкого полирования.

Для проведения высокоточного полирования также применяется гидродинамический принцип обработки (упругоэмиссионная обработка). В данном методе нагруженный упругий полиуретановый шар полирует деталь при ее сканировании. Шар вращается с большой скоростью в полирующей жидкости и вследствие гидродинамических сил всплывает над ее поверхностью и обрабатывает деталь.

Принцип использования жидкой среды в качестве рабочего инструмента положен в основу технологии магнитореологического (МР) полирования, которая в настоящее время известна под торговой маркой MRF.

9.3.2. Основы технологии магнитореологического полирования

Ключевым элементом MRF-процесса является МР-полирующая жидкость. Она представляет собой текучую композицию, свойства которой изменяются под воздействием магнитного поля таким образом, что жидкость преобразуется в пластичный материал. МР-жидкость состоит из ферромагнитных частиц диаметром до 0,1 мкм, взвешенных в несущей среде. Под воздействием магнитного поля частицы намагничиваются и выстраиваются в цепочки. Эти цепочки образуют пространственную структуру с увеличивающимся пределом текучести (упругости). В отсутствие магнитного поля частицы возвращаются в дезорганизованное (свободное) состояние и начальные свойства материала восстанавливаются.

В состав полирующей МР-жидкости входят четыре основных компонента: вода, магнитные частицы, абразив и химические добавки. Выбор воды в качестве несущей среды обусловлен тем, что вода служит химическим агентом при обработке стекол. Такая МР-жидкость представляет собой бингамовский пластичный материал с упругостью, управляемой магнитным полем (жидкость, которая изменяет свою упругость под воздействием, например, магнитного поля, называется бингамоновской).

Блок-схема станка для МР-полирования показана на рис. 9.8. Станок имеет вертикальное колесо 1, обод которого в виде шарового пояса служит поверхностью для перемещения жидкости. Электромагнит 7, расположенный под ободом, создает требуемое магнитное поле в зоне полирования. Система подачи МР-жидкости обеспечивает непрерывную циркуляцию и снабжение зоны полирования свежей жидкостью. Система включает сопло подачи 6 и скребок 2, подающий 5 и всасывающий 3 насосы, а также кондиционер 4, который непрерывно измеряет параметры МР-жидкости и стабилизирует их (предотвращает нагрев жидкости, оседание частиц, изменение влагосодержания вследствие испарения, а также поддерживает рН-среды).

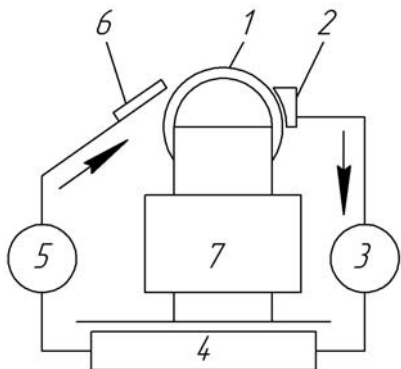


Рис. 9.8. Блок-схема станка для МР-полирования

Линза помещается на некотором расстоянии от вращающегося колеса 1 таким образом, что поверхности линзы и колеса формируют сходящийся (клиновидный) зазор. Такая конфигурация рабочей зоны позволяет обрабатывать детали с плоской, выпуклой или вогнутой рабочей поверхностью. Полирующая МР-жидкость подается на колесо 1 непосредственно над электромагнитом и образует полирующую ленту. При перемещении в область действия поля лента приобретает пластические свойства и насыщается абразивом, находящимся во взвешенном состоянии. Лента притягивается к вращающемуся колесу 1 магнитным полем и протягивается через сужающийся зазор, в результате чего происходит сьем материала в зоне контакта детали с лентой. Эта контактная зона получила название «полировальное пятно».

Скорость съема материала может устанавливаться магнитным полем, геометрическими размерами пятна (за счет изменения зазора), а также скоростью вращения колеса 1. В процессе полирования время контакта регулируют в соответствии с ошибкой формы поверхности детали.

Вследствие адаптивности к форме обрабатываемой поверхности и зонной (субапертурной) природы полировальный МР-инструмент способен обрабатывать детали сложной формы, такой, например, как асферическая или с непрерывно меняющейся локальной кривизной. Преимуществом МР-полирования по сравнению с другими методами финишной обработки оптических деталей является то, что благодаря постоянному контролю за параметрами циркулирующей жидкости и поддержанию их стабильности во времени полировальный инструмент не изнашивается. Отходы полирования и тепло непрерывно отводятся. Метод не требует специфической оснастки или инструментария.

Вследствие адаптивности к форме обрабатываемой поверхности и зонной (субапертурной) природы полировальный МР-инструмент способен обрабатывать детали сложной формы, такой, например, как асферическая или с непрерывно меняющейся локальной кривизной. Преимуществом МР-полирования по сравнению с другими методами финишной обработки оптических деталей является то, что благодаря постоянному контролю за параметрами циркулирующей жидкости и поддержанию их стабильности во времени полировальный инструмент не изнашивается. Отходы полирования и тепло непрерывно отводятся. Метод не требует специфической оснастки или инструментария.

9.3.3. Моделирование съема материала при МР-обработке

Нагрузка на абразивную частицу является основным фактором при анализе съема материала абразивными суспензиями, в частности при по-

лировании. В общем случае полирование происходит за счет прижатия упругого полировальника со связанными абразивными частицами к обрабатываемой поверхности.

Согласно Ф. Престону, интенсивность съема материала в этом случае пропорциональна прикладываемому давлению и скорости движения детали относительно инструмента. Интенсивность съема зависит также и от параметров контактной зоны, таких как механические характеристики (например, упругость) полировальной подложки, которая передает импульсную нагрузку абразивной частице. Учитывая, что МР-жидкость в магнитном поле загустевает и приобретает упругие свойства, подобный намагниченный материал можно рассматривать как подвижную полировальную ленту, аналогичную традиционному полировальному инструменту со смоляной или иной подложкой.

Нагрузка на абразивные частицы может быть обеспечена за счет течения жидкости, в частности, в условиях касательного течения концентрированной суспензии твердых частиц. При достаточно высокой скорости такое течение сопровождается интенсивным столкновением частиц между собой и с поверхностью, ограничивающей поток (например, с поверхностью линзы). В случае бинарной (двухкомпонентной) суспензии и согласно принципу сохранения импульса количества движения крупные частицы при столкновении могут передать определенную нагрузку (импульс) мелким частицам. Когда такое столкновение происходит вблизи обрабатываемой поверхности, это может привести к эффективному внедрению мелкой частицы в поверхность, особенно если частица обладает соответствующими механическими характеристиками. Применительно к полированию эта модель означает, что крупные абразивные частицы воспринимают энергию потока и снабжают малые частицы импульсной нагрузкой, требуемой для внедрения в поверхность и съема материала.

Глава 10. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

10.1. Проектирование технологических процессов

В основу разработки технологических процессов положены два принципа – технологический и экономический. Первый предусматривает обеспечение выполнения всех требований чертежей и ТУ, а второй – выполнение этих требований с минимальными затратами сырьевых, энергетических и людских ресурсов. Технологический процесс изготовления той или иной детали должен быть оптимальным для данного предприятия.

При всем многообразии оптических деталей все они характеризуются общностью выполнения отдельных операций по их изготовлению. В связи с этим при разработке технологического процесса для изготовления какой-либо детали за основу берется типовой технологический процесс с вклю-

чением в него дополнительных операций, учитывающих конструктивно-технологические особенности данной детали.

Разработка типового технологического процесса сводится к следующему:

1. Все детали группируют в классы в зависимости от конфигурации и размеров, точности изготовления, общности схем базирования, последовательности операций, типов оборудования и оснастки, методов и средств контроля.

2. Устанавливают комплексную деталь, содержащую все геометрические элементы деталей данного класса.

3. Для комплексной детали каждого класса разрабатывают типовой или несколько вариантов типовых технологических процессов, которые с небольшими изменениями (подналадкой оборудования, введением дополнительных приспособлений, операций и т. п.) можно применить при обработке любой детали, входящей в данный класс.

Комплексная деталь может быть реальной или условной. В качестве реальной выбирают наиболее сложную деталь данного класса, а в качестве условной – деталь, содержащую все геометрические элементы (поверхности, углы, фаски и т. п.) деталей данного класса.

Для ускорения подготовки производства на предприятиях внедряется автоматическая система технологической подготовки оптического производства на базе ЭВМ с использованием пакетов прикладных программ.

10.2. Технология изготовления плоскопараллельных пластин и клиньев

10.2.1. Грубое и среднее шлифование (фрезерование)

Задачей грубого шлифования является придание заготовкам стекла формы будущих деталей с их основными угловыми и линейными размерами.

При использовании заготовок в виде прессованного штабика (пластин) первой операцией является распиливание заготовки с припуском на линейные размеры. При использовании штучных заготовок обработку начинают со сборки блока и установки его на столе плоскошлифовального станка. В качестве последних в оптической промышленности наибольшее распространение получили вертикально-фрезерные станки модели СФ и плоскошлифовальные модели ЗБ 756. Заготовки размерами менее $5 \times 50 \times 100$ мм устанавливают плотно одна к другой на поверхности электромагнитного станка, а по контуру стола размещают стальные планки.

Поверхность заготовок обрабатывают кольцевым алмазным инструментом (фрезами) зернистостью от 200/160 до 50/40. Крупнозернистый инструмент применяют для обработки поверхностей больших размеров и подвергающихся вторичному шлифованию алмазным инструментом зернистостью 50/40 или микропорошком М28. При небольших припусках на

поверхность (порядка 1 мм) применяют однократное шлифование алмазной фрезой зернистостью 63/50–50/40. Толщина слоя стекла, снимаемая с первой поверхности заготовки, ограничивается величиной, требуемой для удаления дефектов прессования (складки, точки, шамот). Оставшуюся часть припуска, предусмотренного на данную операцию, снимают при шлифовании второй поверхности.

После обработки первой поверхности выполняют разблокировку (разборку) блока пластин (клиньев) с последующей блокировкой для обработки второй стороны. Тонкие заготовки отклеивают от пластин с помощью электроплит, а пластины промывают в горячем (90 °С) 4%-м растворе кальцинированной соды. При обработке второй поверхности выдерживают толщину деталей и их параллельность, которая обычно задается в угловой мере. Переход от углового измерения к линейному осуществляется по формуле

$$T = 0,0003\theta D,$$

где T – допуск на разность толщин в диаметрально противоположных точках пластины или блока, мм;

θ – допуск в угловых минутах на параллельность (клин);

D – диаметр (или длина) детали или блока.

Если θ задан в угловых секундах, то вместо коэффициента 0,0003 необходимо использовать коэффициент 0,000005 ($0,0003 = \text{tg} 1'$; $0,000005 = \text{tg} 1''$). Толщину деталей измеряют глубиномером, штангенциркулем, микрометром или скобой, а плоскостность – индикаторным кольцевым сферометром, лекальной линейкой или притиркой к контрольной планшайбе.

Заготовки деталей ограниченного выпуска обрабатывают абразивными порошками путем перемещения заготовок по вращающемуся шлифовальнику (на станке модели ОС-350). Заготовки размером 50–100 мм наклеивают на планшайбу, а больших размеров – обрабатывают по одной штуке. В процессе обработки заготовки необходимо перемещать через центр шлифовальника с повышением на них в этот момент давления. Указанное движение заготовки и распределение давления на нее обеспечивают получение плоской поверхности с высокой точностью и длительное пользование шлифовальником без его подрезки, т. е. равномерный износ во всех зонах.

Обе поверхности пластины при ручной обработке шлифуют последовательно шлифпорошком № 6–4 и микропорошками М40 и М28 до сошлифовывания следов прессования или предшествующей обработки, выдерживая необходимую толщину и параллельность.

При шлифовании микропорошком М22 обрабатываемая поверхность присасывается к шлифовальнику (300 об/мин).

При изготовлении клиньев заготовки 1 (рис. 10.1, а) либо вклеивают в пазы металлических приспособлений 2, либо наклеивают на специальные стеклянные или металлические сухарики 3 (рис. 10.1, б). Угол наклона

опорных плоскостей пазов или сухариков должен быть равен заданному углу α клина. При обработке выдерживают размер a .

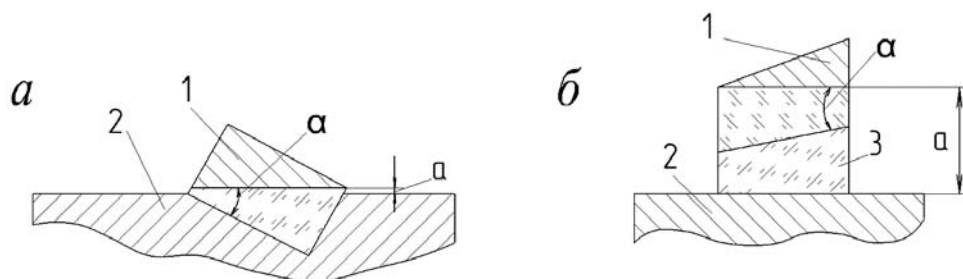
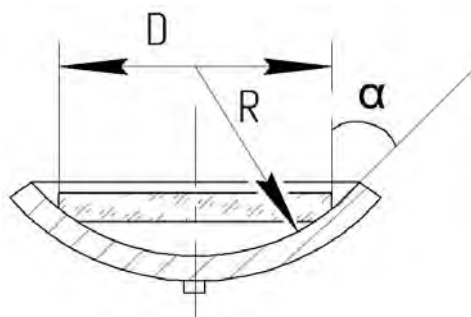


Рис. 10.1. Приспособления для обработки клиньев

Далее выполняют сборку заготовок в столбики для обработки боковых (нерабочих) поверхностей. С этой целью детали нагревают и склеивают воском в специальных угольниках. Заготовки круглой формы обрабатываются по диаметру на круглошлифовальном станке, а более сложной формы – на фрезерном станке модели СФ-7 с программным управлением.

Заключительной операцией предварительной обработки заготовок является их фасетирование, выполняемое вручную на станках с алмазосной чашкой или планшайбой. Радиус чашек R определяется заданным углом φ наклона фаски и диаметром D пластины (рис. 10.2):



$$R = \frac{D}{2 \cos \varphi}$$

Операцию можно выполнить и с помощью абразивной суспензии (№ 6 – М20). Инструментом служит металлическая чашка.

Рис. 10.2. Фасетировочная чашка

10.2.2. Мелкое шлифование

Основной задачей мелкого шлифования является уточнение размеров заготовки после среднего шлифования и улучшение качества поверхности (придание ей более мелкой структуры) с целью ускорения последующего полирования.

Технологический процесс начинается с выполнения сборки блока (блокировки).

Соединение заготовок с приспособлением (наклеечником) осуществляется приклеиванием наклеечными смолами. Крепление смолами может быть двух типов: эластичное и жесткое. Наиболее универсальным является эластичное крепление, которое за счет большой толщины слоя смолы обес-

печивает наименьшие деформации обрабатываемых заготовок, что важно при получении поверхностей с жесткими допусками по N и ΔN .

На заготовки малых размеров смола наносится в виде сплошных подушек вручную или на клеечном полуавтомате, а на более крупных заготовках (размером 80–100 мм) – в виде полосок или точек. Последний вид крепления применяют в единичном и мелкосерийном производстве, а также для деталей малой жесткости (с малой относительной толщиной $t:D$). В крупносерийном и массовом производствах целесообразнее применять жесткий метод крепления, как менее трудоемкий.

Мелкое шлифование выполняют на станках модели ШП методом свободного притира водными суспензиями микропорошков М20 и М10 в два перехода или в один переход алмазным инструментом в виде планшайбы с нанесенными на ее рабочую поверхность алмазосодержащими элементами.

Толщина слоя стекла, которую необходимо сошлифовать микропорошком каждой зернистости, равна разности в глубине $F_{M_{n-1}}$ и F_{M_n} слоев, нарушенных абразивом $F_{M_{n-1}}$ предшествующего и абразивом F_{M_n} данного переходов, т. е.

$$h = F_{M_{n-1}} - F_{M_n}.$$

Практически это обеспечивается визуальным (или с помощью лупы) наблюдением за фактурой (степенью шероховатости) шлифуемой поверхности детали. При мелком шлифовании толщина детали изменяется мало, поэтому ее следует контролировать главным образом при изготовлении точных плоскопараллельных пластин или клиньев.

Плоскостность поверхности после мелкого шлифования проверяется таким же образом, как и после грубого шлифования. Иногда здесь применяют пробные стекла.

Для ускорения полирования большое значение имеет высокая чистота поверхностей деталей после мелкого шлифования. При мелком шлифовании дефектами являются: царапины, мелкие точки, неравномерность шероховатого слоя, увеличенная глубина выколов или недошлифовка отдельных зон поверхности. Дефекты обнаруживают с помощью лупы не менее 3^x увеличения при ярком освещении контролируемой поверхности.

10.2.3. Полирование

Одной из особенностей обработки деталей методом свободного притира является следующее требование: поверхность обрабатывающего инструмента (шлифовальника и полировальника) должна быть концентрична поверхности обрабатываемого блока. Поэтому после окончания шлифования, тщательной промывки и контроля какой-либо поверхности блока ее необходимо отполировать в том же блоке.

Операция полирования деталей должна обеспечивать:

- 1) прозрачность, т. е. отсутствие следов шлифования;
- 2) точность кривизны в заданных пределах по общим (N) и местным (ΔN) ошибкам;
- 3) требуемую чистоту.

Для обеспечения первого требования приходится снимать слой стекла порядка нескольких микрометров. Наиболее трудно выполнение второго условия, когда снимается слой стекла в доли микрометров. В целом процесс полирования весьма трудоемок.

Полирование выполняют способом свободной притирки на станках того же типа, что и мелкое шлифование. В качестве материала подложки полировальника наиболее широко используют полировочную смолу и волокнистые материалы (войлок, фетр, сукно, замша).

Полирование волокнистыми материалами применяется для изготовления оптических деталей с большим допуском по N и ΔN ($N = 10-15$; $\Delta N = 2-5$, т. е. конденсорная и окулярная оптика). Если материал подложки является сильно ворсистым, то его следует опалить огнем для уничтожения ворса и слегка увлажнить водой. Затем подложку кладут на слой размельченной смолы, покрывающей поверхность разогретого полировального инструмента, и обжимают специальным инструментом на прессе (на практике зачастую обжимают шлифовальником непосредственно на станке).

После формовки еще теплый полировальник устанавливают на шпиндель станка и располировывают его до полного пропитывания полирующим порошком и выравнивания формы.

Увеличение щелочности суспензии приводит к снижению производительности полирования в результате разрушения ткани щелочью. Максимальная прочность волокон имеет место при $\text{pH} = 2-9$.

Полирование волокнистыми материалами может быть интенсивным: линейная скорость 3–6 м/с, давление – до $2,5 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4$ Н/м².

При изготовлении точных оптических деталей (по N и ΔN) используют смоляной полировальник. Для получения плоской смоляной подложки расплавленную смолу выливают на инструмент (план), обклеенный по периметру плотной бумагой. После затвердевания в середине подложки делают углубление для того, чтобы смола в процессе полирования могла растекаться и принимать форму поверхности блока.

Для обеспечения распределения полирующей суспензии по поверхности полировальника на нем делаютрезы-канавки в виде сетки или спирали. Этирезы способствуют также лучшей приработке поверхности полировальника к поверхности блока. Нельзя располагатьрезы симметрично относительно середины (центра) полировальника, так как при этом поверхность блока будет обрабатываться неравномерно.

Перед началом полирования полировальник следует слегка нагреть теплой водой, смочить полирующей суспензией и окончательно формовать поверхностью обрабатываемого блока вручную.

Для нормального течения процесса полирования необходимо предварительно правильно выбрать вязкость смолы подложки. Оптимальное значение вязкости смолы зависит от режима полирования и температуры окружающей среды. Для повышения скорости, давления, диаметра блока и температуры воздуха и при незначительной подаче полирующей суспензии вязкость смолы должна увеличиваться. С повышением требований к точности полирования (по N и ΔN) вязкость смолы следует понижать. Также обильная непрерывная подача суспензии позволяет работать при меньшей вязкости смолы.

В процессе полирования оптических деталей постоянно контролируют N и ΔN и при необходимости проводят изменения наладочных параметров станка. При сорванном крае полируют наименьшим количеством полирита, уменьшают давление на верхний инструмент и скорость вращения шпинделя, осуществляют общую подрезку полировальника (можно еще взять более твердую смолу).

При астигматической поверхности уменьшают скорость вращения шпинделя, увеличивают давление на верхний инструмент и длину штриха поводка, смещают поводок вперед или назад, выполняют общую подрезку полировальника.

Для устранения местного бугра поводок смещают назад или вперед на 0,1 диаметра блока, увеличивают давление и скорость вращения кривошипа. Для устранения местной ямы поводок смещают на 0,1 диаметра блока и уменьшают давление. Местные ошибки возникают как результат существующего несоответствия размеров инструмента и блока и грубых ошибок в настройке станка.

«Цвет» регулируют применением одного-двух приемов, создавая условия для плавного изменения зонального срабатывания. Применение сразу всех приемов вызывает резкое изменение зонального срабатывания стекла и приводит к образованию асферической поверхности.

Необходимо учитывать, что кроновые стекла полируются хорошо, а флинтовые являются мягкими и легко царапаются. Тяжелые кроны легко покрываются налетами.

В процессе полирования могут появиться следующие дефекты: точки (причины – недоброкачественное шлифование, недополировка), царапины (причины – плохая промывка блока перед полированием, загрязнение полирующей суспензии или полировальника, грязное рабочее место, неправильное наложение РПС), выколки (причина – небрежная работа), налеты (причины – загрязнение полирующей суспензии или защитного лака, длительное хранение незащищенных лаком деталей), неправильный «цвет» (причины – недоброкачественное шлифование, неправильный режим полирования, деформация наклеечной смолы, длительное хранение блока), отклейка деталей (причина – промывание блока холодной водой).

При полировании деталей средней ($N = 2-6$, $\Delta N = 0,5-2,0$) и высокой ($N = 0,1-2,0$; $\Delta N = 0,05-0,5$) точности применяют различные режимы.

В первом случае $v_{\text{вн}} = 0,6 - 1,0$ м/с, $P_{\text{уд}} = 0,5 \cdot 10^4 - 1,5 \cdot 10^4$ Н/м², во втором $v_{\text{вн}} = 0,2 - 0,3$ м/с, $P_{\text{уд}} = 0,2 \cdot 10^4 - 0,5 \cdot 10^4$ Н/м². Линейная скорость полировальника при частоте вращения кривошипа 5–15 об/мин и длине штриха 0,3–0,5 диаметра полировальника равна 0,1–0,2 м/с.

По окончании полирования первой стороны обрабатываемых деталей (должна быть достигнута требуемая плоскостность, т. е. N , ΔN и чистота поверхности) блок снимают со станка, промывают в теплой воде, лакируют и подают на разблокировку с последующей блокировкой для обработки второй стороны. Технология обработки второй стороны аналогична первой.

Операция лакировки заключается в нанесении слоя нитроэмали на полированную поверхность еще не снятых с блока пластин. Нитроэмаль наносят кистью. Нитроэмаль должна быть любого темного цвета для того, чтобы при контроле второй стороны пластины и наложении РПС лучше была видна интерференционная картина.

Наиболее распространенным способом разблокировки оптических блоков является охлаждение их в камере при температуре от -30 до -50 °С. Отделение заготовок от приспособления (наклеечника) происходит в результате тангенциальных сил, возникающих в склеивающем слое за счет разности ТКЛР смолы $(6-10) \cdot 10^{-3}$ и стекла $(6-10) \cdot 10^{-7}$ °С⁻¹.

Применяется также ультразвуковой способ разблокировки. Отделение заготовок в данном случае происходит в результате неодинаковой частоты вынужденных собственных колебаний металлического наклеечного приспособления, смолы и стекла.

При шлифовании пластин и клиньев необходимо учитывать следующее. В результате проникновения жидкости в трещины слоя стекла, нарушенного шлифованием, в самом стекле образуются продукты его гидролиза, которые вызывают возникновение расклинивающих усилий. Под их действием поверхностные слои стекла растянуты. У пластинки, обе поверхности которой отшлифованы, растягивающие усилия уравновешены. Удаление нарушенного слоя в процессе полирования одной из поверхностей нарушает это равновесие, но так как положение заготовок на приспособлении зафиксировано, то деформация произойдет после их освобождения от закрепления. Глубина нарушенного слоя, величина напряжений и деформаций диска будут тем меньше, чем мельче абразив.

10.2.4. Доводка в сепараторах

Для деталей, имеющих высокие требования к плоскостности полированной поверхности ($N \leq 1$, $\Delta N \leq 0,1$), применяют доводку в сепараторах. Сепаратор представляет собой диск (рис. 10.3, а) из стекла ЛК5, ЛК7 (малый коэффициент термического расширения) или КВ диаметром 150–450 мм и толщиной $t = 30-80$ мм ($t \cong 0,1D$). Рабочая поверхность сепаратора отполирована с точностью $N = 1-A$ и $\Delta N = 0,1-0,4$. В диске имеется несколько

отверстий, каждое из которых на 5–10 % больше диаметра обрабатываемых деталей. Отверстия в сепараторе (см. рис. 10.3, а) расположены на разных угловых расстояниях друг от друга ($\varphi_1 \neq \varphi_2 \neq \varphi_3$) и на различных расстояниях от центра ($R_1 \neq R_2 \neq R_3$), что уменьшает вероятность образования зональных (местных) ошибок. Суммарная площадь отверстий не превышает 30 % всей площади сепаратора.

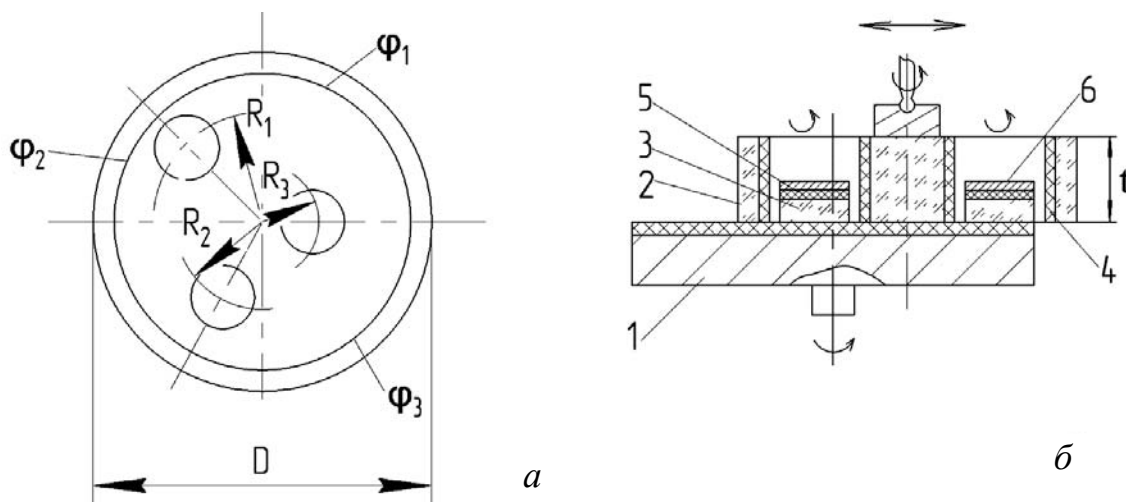


Рис. 10.3. Доводка плоских деталей в сепараторе

Сепаратор 2 устанавливают на полировальник 1 (рис. 10.3, б). В отверстия сепаратора укладывают пластины 3, предварительно отполированные с $N \leq 2$ и $\Delta N \leq 0,3$. Стенки отверстий сепаратора обклеивают резиной 4. Если деталь тонкая, то на нее устанавливают кружок сукна 5 и груз б (давление на деталь должно быть меньше, чем на сепаратор). При необходимости устранить клин груз устанавливают на толстый край детали.

При движении сепаратора по полировальнику он своей рабочей поверхностью формирует полировочную смолу. Детали, перемещаясь по полировальнику, принимают форму его поверхности (детали практически не участвуют в формировании полировальника, поскольку их удельное давление на поверхность последнего меньше, чем давление сепаратора). Диаметр полировальника принимают равным 1,1–1,3 диаметра сепаратора. Линейная скорость полировальника при частоте вращения кривошипа 5–15 об/мин и длине штриха 0,3–0,5 диаметра полировальника равна 0,1–0,2 м/с.

В процессе доводки деталей в сепараторах повышению точности формообразования способствуют и такие технологические факторы:

исключение приклеивания к приспособлению и связанных с этим деформаций;

приближение прижимного усилия к плоскости обработки детали, что уменьшает опрокидывающий момент и его неравномерное влияние на износ;

отсутствие выхода детали за край полировальника и неравномерное распределения давления по ее поверхности;

сложное движение детали по поверхности полировальника.

Все это существенно уменьшает вероятность образования зональных ошибок.

При обработке в сепараторе деталей прямоугольной формы равномерное вращение последних затруднено, что неблагоприятно сказывается на точности их формообразования, поэтому на такие детали одевают неметаллические кольца.

При длительной работе поверхность сепаратора теряет точность, срабатываясь на бугор или яму, поэтому его правят переполировкой.

10.2.5. Контроль плоскостности и клиновидности полированных пластин

Для контроля качества полированных поверхностей наибольшее распространение в оптическом производстве получил метод пробных стекол, так как он имеет достаточно высокую точность в сочетании с простотой и наглядностью. Точность оценки кривизны полос в данном случае достигает 0,1 полосы, т. е. качество поверхностей контролируется с точностью порядка 0,03 мкм. Использование монохроматического света повышает резкость интерференционной картины и точность контроля.

Вместе с тем метод пробных стекол имеет известные недостатки, которых лишен бесконтактный метод контроля на интерферометрах. Принципиальные схемы различных типов интерферометров для контроля плоских поверхностей одинаковы и основаны на использовании интерференции между эталонной и контролируемой поверхностями. Воздушный зазор в этом случае имеет значительную величину (порядка нескольких миллиметров), и его можно регулировать механическими устройствами. Оптическая схема одного из интерферометров для контроля плоскостей и плоскопараллельности приведена на рис. 10.4.

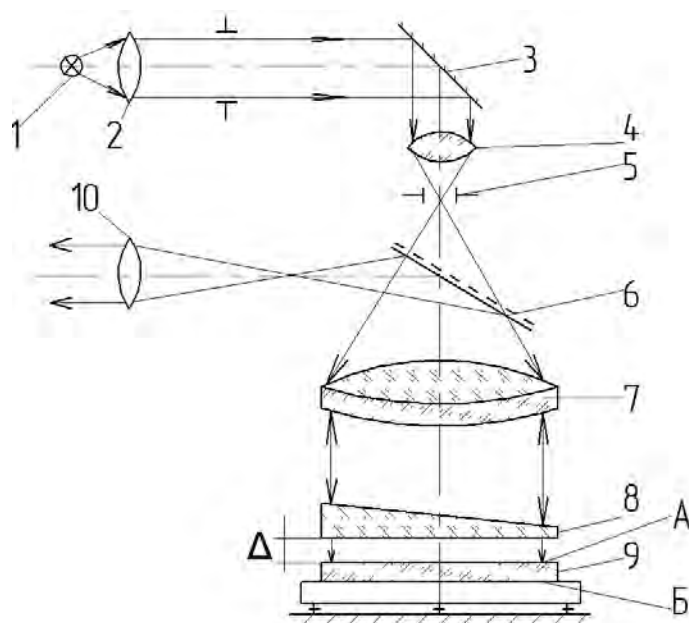


Рис. 10.4. Оптическая схема интерферометра для контроля плоскостей

Источник света *1* (ртутная лампа) с помощью конденсорных линз *2* и *4* и зеркала *3* освещает раздвижную щелевую диафрагму *5*, установленную в фокальной плоскости объектива *7*. Параллельный пучок лучей, выходящий из объектива *7*, попадает на клиновидную пластину *8* и контролируемую деталь *9*. Нижняя поверхность клиновидной пластины *8* является эталонной. В воздушном клине между проверяемой и эталонной поверхностью возникают интерференционные полосы разной толщины, которые локализованы на нижней поверхности пластины *8*. Пучки лучей, отраженные от этих поверхностей, проходят через объектив *7*, отражаются полупрозрачной пластиной *6* и поступают в окуляр *10*.

Интерферометр может быть использован также и для контроля плоскопараллельности (клиновидности) пластин. Для этого наблюдают интерференционную картину между полированными поверхностями *A* и *B* этой пластины и по формуле

$$\alpha = \frac{N\lambda}{2n_{\lambda}l}$$

определяют угол клина. В этой формуле *N* – число колец или полос на длине *l* поверхности детали;

λ – длина волны монохроматического источника света;

n_{λ} – показатель преломления стекла пластины *9* для данной λ .

Чтобы выполнить такое измерение, необходимо учесть следующее. Известно, что для наблюдения интерференционной картины с достаточной видимостью (например, с $V = (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}) \approx 0,1$, где E_{\max} и E_{\min} – максимальная и минимальная освещенность интерференционных полос), в интерференционной схеме необходимо обеспечить условия, при которых максимальная разность хода интерферирующих световых пучков значительно меньше длины когерентности $L = \lambda^2 / \Delta\lambda$ для применяемого источника света ($\Delta\lambda$ – спектральный интервал интерферирующего излучения). Поэтому для наблюдения интерференционной картины между поверхностями *A* и *B* детали *9* необходимо добиться исчезновения интерференции между поверхностью *A* детали *9* и эталонной поверхностью пластины *8*, что обеспечивается увеличением зазора Δ .

Для измерения угла клина используют гониометры и различные автоколлимационные приборы. Одна из схем автоколлимационного прибора приведена на рис. 10.5.

Пучок лучей через конденсор *4* освещает перекрестие сетки *5* и после отражения от светоделительного слоя куба-призмы *6* направляется объективом *2* на испытуемый клин *1*. Отраженные от передней и задней поверхностей клина пучки лучей образуют в фокальной плоскости объектива на окулярной сетке *7* два автоколлимационных изображения перекрестия сет-

ки 5, расстояние a между которыми определяется по сетке 7 через окуляр 8 или с помощью окуляр-микрометра. Угол Θ рассчитывается по формуле

$$\Theta = \frac{a}{2nf'},$$

откуда видно, что с увеличением f' точность измерения увеличивается.

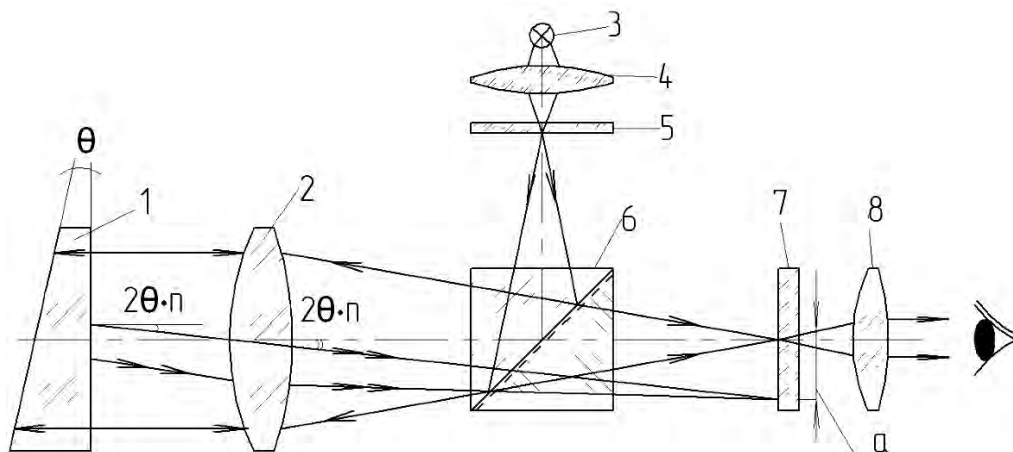


Рис. 10.5. Оптическая схема прибора для контроля угла клина

10.3. Технология изготовления призм

10.3.1. Грубое и среднее шлифование (предварительная обработка)

При использовании кратной заготовки или столбика предварительная обработка начинается с распиливания. Затем заготовки поступают на блокировку. Изготовление призм начинается с обработки боковых поверхностей, которая обычно является окончательной и должна обеспечить требуемую ширину призмы. В условиях единичного производства предварительную обработку выполняют вручную свободным абразивом № 6 и 28 на станках модели ОС (редко ШП). При серийном производстве обычно используют плоскошлифовальные станки модели ЗБ756. Для этого заготовки приклеивают парафином к металлическим пластинам и устанавливают на электромагнитный стол станка. После шлифования первой боковой поверхности детали разблокировывают путем нагрева на электроплите и после их промывки блокируют для обработки второй боковой поверхности.

При обработке боковых поверхностей призм вручную используют аналогичные блоки. Для контроля ширины призмы и ее разнотолщинности в трех или четырех местах блока детали (зачастую – бракованные) приклеивают таким образом, чтобы они частично выступали за наружный диаметр наклейки. Для измерения используют микрометр (реже – штангенциркуль).

Для обработки исполнительных поверхностей при единичном производстве заготовки склеивают боковыми поверхностями в столбик. Длина столбика должна быть примерно в 10 раз меньше катета, но не превышать 200–250 мм. Склеивают воском, а при склеиваемой площади менее 1 см² – шеллаком. Для склеивания используют приспособление в виде точного угольника, который предварительно нагревают.

Грубое шлифование столбика начинается с первого катета и продолжается до удаления следов прессования со всех сторон. При этом выдерживают угол 90_1° с базовой поверхностью столбика (за базовую поверхность принимают одну из боковых поверхностей столбика, например, поверхность А на рис. 10.6). Обдирку осуществляют ручным перемещением столбика по шлифовальнику с соблюдением общих правил, обеспечивающих образование правильной плоскости. Для компенсации неравномерного давления правой и левой рук столбик периодически поворачивают на 180° .

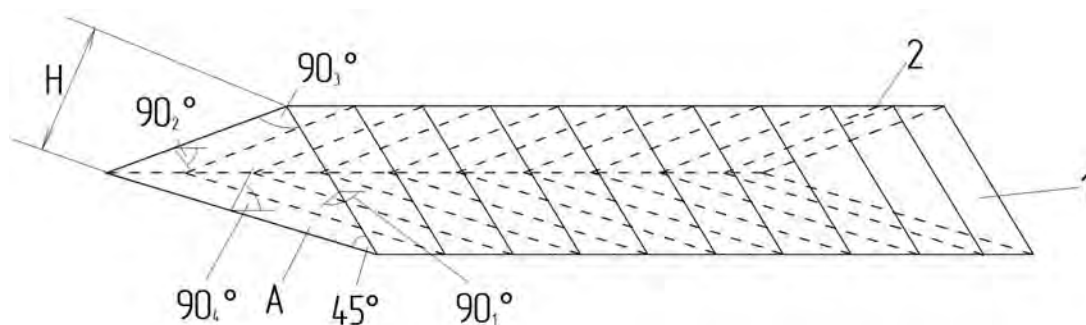


Рис. 10.6. Блок призм в виде столбика

Грубое шлифование поверхности второго катета выполняют тем же способом, но в этом случае выдерживают углы 90° с базовой поверхностью (90_2°) и первым катетом (90_3°). Затем обрабатывают поверхность гипотенузы. При этом выдерживают угол 90° с базовой поверхностью (90_4°), симметричность углов 45° с катетами (δ_{45°), допустимую пирамидальность π и требуемую полноту (высоту) H .

Полноту столбика (призмы) измеряют микрометром до снятия фаски на ребре угла 90° , образованного поверхностями катетов. Пирамидальность определяют как разность между полнотой противоположных концов столбика (призмы), т. е. разность размеров H . Углы 90_1 , 90_2 и 90_4° определяют косину призмы. Все углы в процессе шлифования призм контролируют установленными по эталону угольниками и оптическими приборами.

После грубого шлифования исполнительных поверхностей призм на ребрах столбика снимают технологические фаски 0,3–0,5 мм и этот столбик направляют на среднее шлифование, где обработку проводят аналогичным образом. Затем на ребрах снимают оговоренные чертежами фаски,

столбик расклеивают (нагреванием), заготовки промывают и фасетируют (расклейку столбиков небольших призм выполняют только после полирования всех их поверхностей).

При серийном производстве применяется обработка призм в металлических приспособлениях (для катетной и гипотенузной граней), в пазы которых крепится по несколько столбиков. На стадии грубого и среднего шлифования блокирование столбиков в приспособлениях осуществляют приклеиванием наклейным парафином по жесткому методу (иногда используют приспособление с механическим зажимом). Точность выполнения в приспособлении угловых размеров пазов, по которым базируются призмы, должна быть выше заданной точности изготовления углов самих призм. На металлических приспособлениях обрабатывают призмы с погрешностью углов до $5-8'$. Для получения призм на стадии предварительной обработки с погрешностью углов меньше $1-2''$ применяют приспособления из шлифованных стеклянных призматических брусков, углы которых могут быть выполнены с точностью до $20''$, или же отшлифованные в металлических приспособлениях столбики дополнительно обрабатывают (доводят) поштучно.

При обработке столбиков в приспособлениях (рис. 10.7) контролируют только пирамидальность и δ_{45° . Пирамидальность определяют как разность размеров H_1 и H_2 (H_2 на рисунке не показан), измеренных на двух концах столбика. Для определения δ_{45° измеряют величины H_3 и H_4 для столбиков, находящихся на противоположных сторонах приспособления.

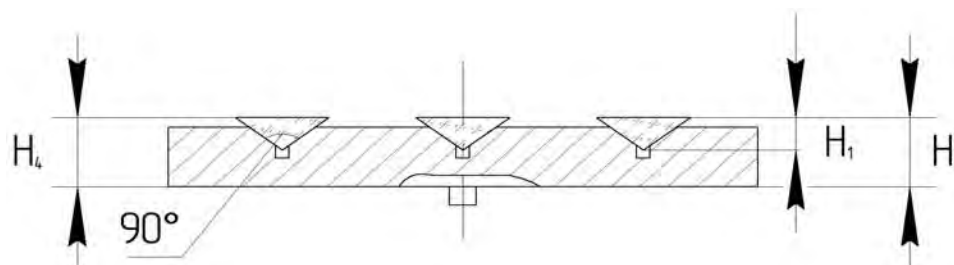


Рис. 10.7. Приспособление для крепления столбика призм

Обработку призм в приспособлениях целесообразно начинать с гипотенузной грани (рис. 10.8).

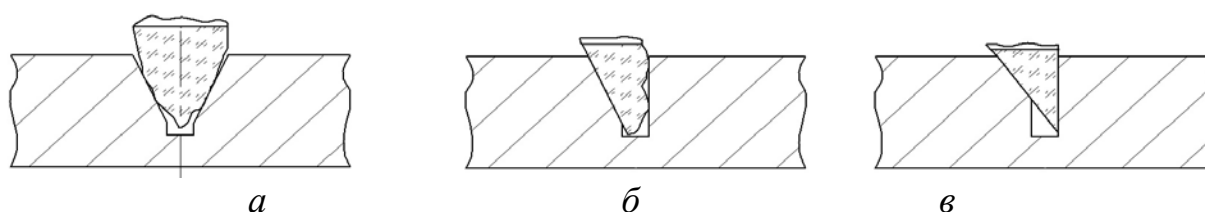


Рис. 10.8. Схема пооперационной обработки призм

При изготовлении призм с крышей сначала обрабатывают оба катета, выдерживая угол 90° . Затем к одному из этих катетов подгоняют одну из граней крыши, после чего обрабатывают вторую грань крыши, выдерживая с первой гранью угол 90° .

10.3.2. Контроль угловых размеров шлифовальных призм

Для контроля угловых размеров призм на стадии их шлифования используются слесарные угольники, механические угломеры, автоколлиматоры (перекидные гониометры) с добавочной плоскопараллельной полированной пластинкой и автоколлимационные приборы скользящего пучка. Угольники (настраиваются по эталонной призме) и угломеры позволяют измерять контактным методом (с оценкой контакта по зазору, на «глаз») углы между двумя плоскостями.

Значительно точнее углы шлифованных призм можно определить оптическим методом – с помощью, например, вертикального (перекидного) гониометра (рис. 10.9). Гониометр состоит из столика 1, регулируемого тремя винтами 2, и автоколлимационной трубы 3. Последняя включает в себя объектив 4 и окуляр Аббе 5, имеющий сетку 6 с призмой 7 и окулярную линзу 8. Грань А призмы 7 покрыта непрозрачным слоем (алюминием, хромом), в котором прорезано прозрачное перекрестие определенной толщины. Сетка 6, имеющая горизонтальную и вертикальную шкалу (рис. 10.9, б), установлена плоскостью гравировки в фокусе объектива и окуляра. На столике 1 закрепляют пластину 9 с эталонной поверхностью В.

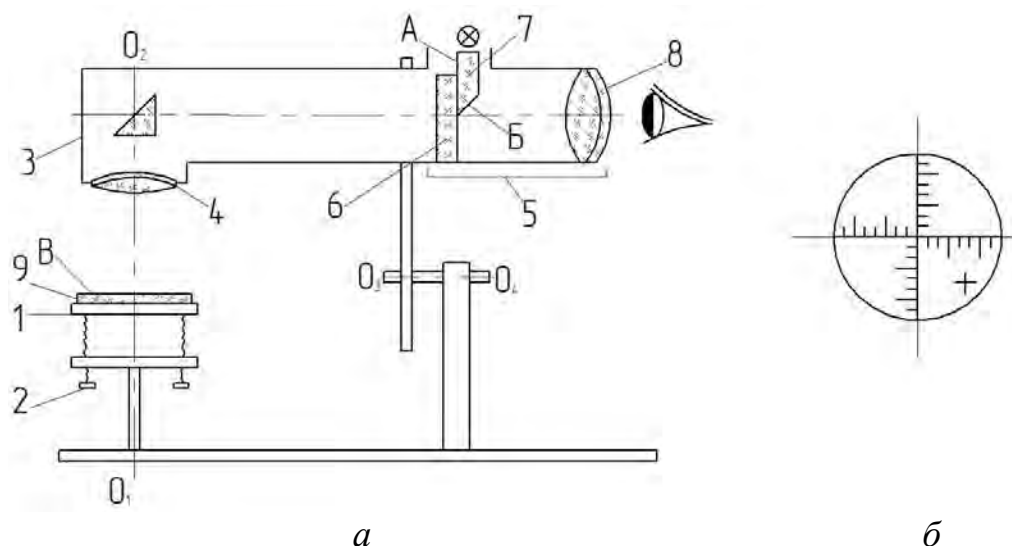


Рис. 10.9. Схема перекидного гониометра

Перед началом измерений визирную ось зрительной трубы 3 устанавливают перпендикулярно поверхности В пластины 9. Для этого столик 1 вращают вокруг оси O_1O_2 и в окуляр 8 наблюдают за автоколлимационным (отраженным от поверхности В) изображением перекрестия призмы 7

в плоскости сетки 6. Если блик смещается в поле зрения, то биение устраняют методом половинных поправок: одну часть компенсируют наклоном столика 1 с помощью винтов 2, а вторую – наклоном трубы 3 вокруг оси O_3O_4 . Затем на поверхность В пластины 9 устанавливают призму с эталонным углом и наклоном трубы 3 вокруг оси O_3O_4 настраивают прибор на требуемый угол (совмещая автоколлимационное изображение перекрестия с центром шкалы сетки 6). Зафиксировав трубу 3, вместо эталона на столик 1 устанавливают контролируемую призму. Для получения автоколлимационного блика от грани шлифованной призмы на этой грани фиксируют (на влагу) плоскопараллельную полировальную стеклянную пластинку. Удвоенную погрешность контролируемого угла оценивают по отклонению автоколлимационного перекрестия от центра шкалы сетки 6. Цена деления шкалы сетки может быть $1'$ и менее (точность измерения угла угольником находится в пределах $1'$, а механическим угломером – $2,5'$).

Схема измерения углов шлифованной призмы прибором скользящего пучка показана на рис. 10.10, где 1 – автоколлимационный окуляр с кубомпризмой 2, сетками 3, 4 и окулярной линзой 5; 6 – объектив; 7 – контролируемая линза; 8 – настраиваемый столик; 9 – неподвижное эталонное зеркало. Прибор работает в скользящих пучках. Для его настройки на столик 8 первоначально устанавливают эталонную призму и наклонами этого столика добиваются совмещения автоколлимационного изображения сетки 3 с центром сетки 4. Затем на столик устанавливают контролируемую шлифованную призму и по смещению автоколлимационного изображения перекрестия сетки 3 относительно центра сетки 4 определяют удвоенную ошибку данного угла призмы. Знак ошибки определяется покачиванием столика 8.

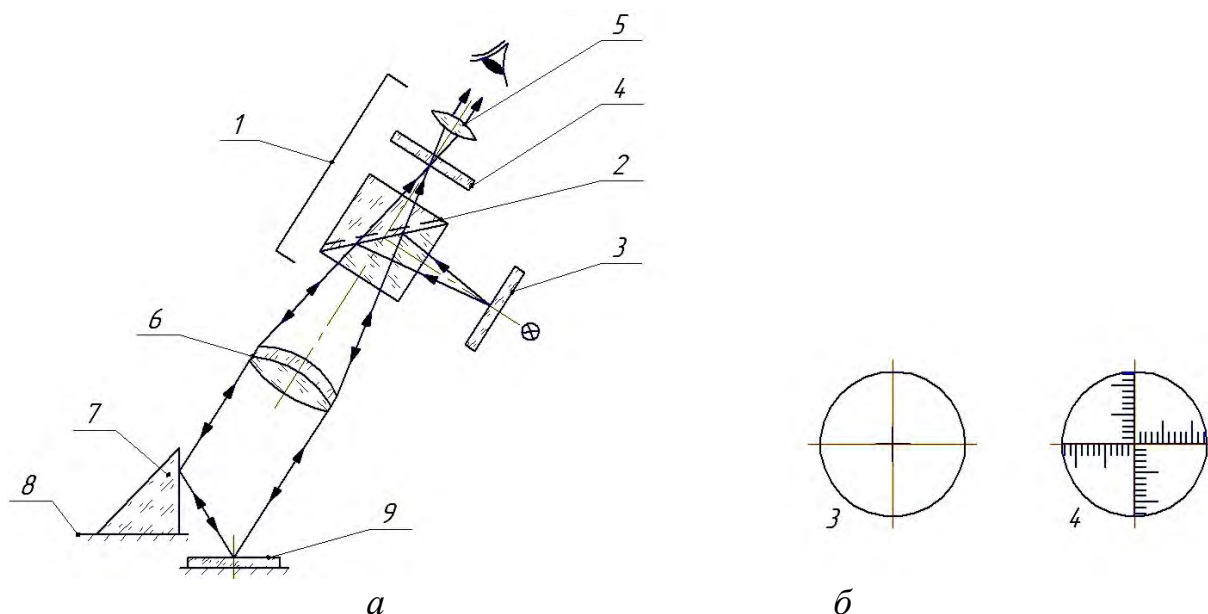


Рис. 10.10. Оптическая схема прибора скользящего пучка

Для контроля пирамидальности шлифованной призмы на столик 8 ее устанавливают боковыми гранями.

10.3.3. Мелкое шлифование и полирование (окончательная обработка)

Наиболее целесообразно окончательную обработку призм выполнять в последовательности: «катет–катет–гипотенуза», поскольку при обработке в качестве последней грани гипотенузы наиболее удобно выдерживать допуск на δ_{45° и пирамидальность.

При изготовлении призм невысокой точности (с допуском на углы 5' и более) используют эластичный способ приклеивания смолой к приспособлению с пазами и крепление гипсованием. Сборка блока при эластичном способе блокирования начинается с наклеивания на нагретые заготовки смоляных подушек, после чего заготовки устанавливают (притирают) на рабочую плоскость вспомогательного (притирочного) приспособления (в качестве последнего часто используют шлифовальник). Расположение заготовок должно соответствовать установочным элементам (пазам) наклеечного приспособления, которое в разогретом виде опускают на заготовки со смолой. После оплавления смолы и остывания блока заготовки плотно закрепляются на наклеечном приспособлении.

Мелкое шлифование и полирование исполнительных поверхностей призм, а также контроль их параметров (N , ΔN , P) проводят таким же образом, как и в случае плоскопараллельных пластин.

Перед блокировкой призм (столбиков) для обработки гипотенузной грани первоначально «связывают» эту грань с обоими катетами, т. е. подгоняют разность углов 45° . Для этого вручную гипотенузную грань призмы подшлифовывают микропорошком № 10, этой гранью призму устанавливают на столик перекидного гониометра и наблюдают за положением автоколлимационного блика на сетке зрительной трубы. Блики на сетке должны занимать одинаковое положение. Аналогичным образом иногда подгоняют угол 90° (перед блокировкой призм для обработки второго катета).

При обработке более точных призм (с допуском на угол в пределах 1') зачастую используют стеклянные (шлифованные) наклеечные приспособления, детали на которых фиксируют по жесткому методу.

Для обработки точных призм (с погрешностью углов 3–5") применяют специальные контактные приспособления (рис. 10.11). Приспособление представляет собой прямоугольную стеклянную пластину 3, углы которой обработаны с погрешностью 1–2", а боковые поверхности – с точностью до $N = 1$.

В центре пластины клеим 2 приклеен ниппель 1 для передачи движения от пальца поводка станка. Призму 4 предварительно точно отполированной (в металлическом приспособлении или гипсе) стороной с помощью оптического контакта крепят к боковым поверхностям контактной пластины 3. Чтобы обрабатываемые поверхности призм 4 лежали в одной плоскости с поверхностью пластины 3, сборку блока производят на точно от-

полированной пластине 5, которая часто является пробным стеклом. Сначала на нее устанавливают пластину 3. При этом сверху должна быть видна интерференционная картина. Затем на пластину 5 устанавливают призму 4 той стороной, которую в дальнейшем будут обрабатывать. Двигая призму к боковой поверхности пластины 3, добиваются, чтобы она «села» на оптический контакт. После этого стекло 5 удаляют, а собранный блок направляют на обработку. Все приспособления вместе с призмами шлифуют микропорошком М10, контролируя разнотолщинность контактной пластины 3 (толщина пластины по четырем углам должна быть одинаковой), а затем полируют.

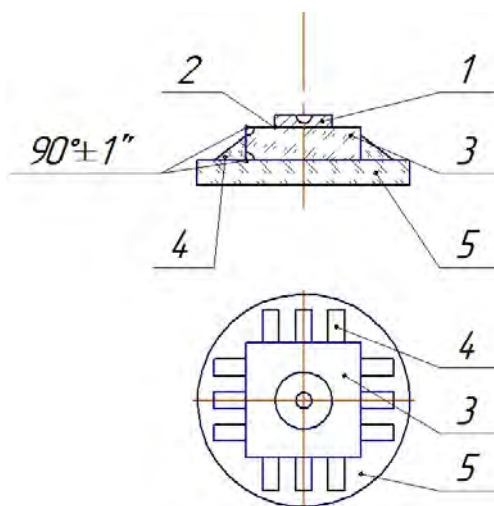


Рис. 10.11. Контактное приспособление для обработки точных призм

Иногда удобнее первоначально отполировать гипотенузную грань призмы, поскольку тогда можно обойтись одним контактным приспособлением 3 (рис. 10.12, а, б). При отсутствии таких приспособлений можно использовать плоскую контактную пластину 3 и точно изготовленную призму 3' (рис. 10.12, в).

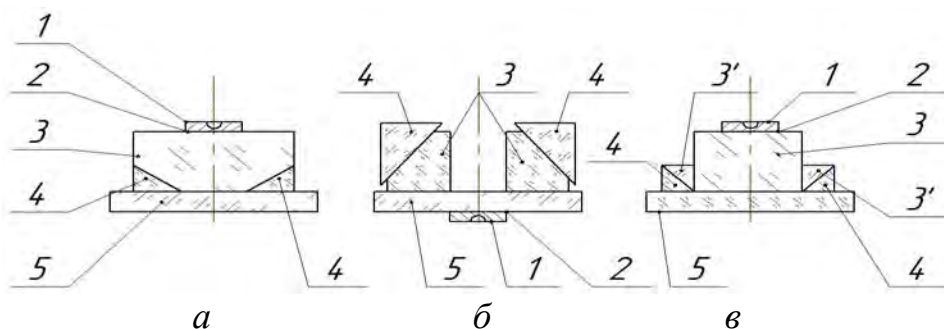


Рис. 10.12. Типы контактных приспособлений:

1 – ниппель; 2 – клей; 3, 5 – контактные пластины; 3', 4 – призмы

В реальных приборах часто возникает необходимость использовать призмы с острыми ребрами (например, ребро угла 90° призмы АР-90 или

ребро крыши крышеобразной призмы). В таких случаях призму «сажают» на оптический контакт на контактную пластину, нижняя поверхность которой не имеет фаски (на соответствующем ребре призмы также не должно быть фаски), и обрабатывают такой блок (шлифуют и полируют) до исчезновения выволок и бисера на границе «деталь–приспособление».

10.3.4. Контроль полированных призм

Окончательный контроль призм включает проверку заданных по чертежу углов, пирамидальности и разрешающей способности.

Значения углов призм измеряют на вертикальном и горизонтальном (типа Г5) гониометрах. Измерения на вертикальном гониометре производятся по эталонной призме.

На указанных гониометрах, как и на любом другом автоколлиматоре, имеющем соответствующую шкалу и регулируемый поворотный столик, могут быть измерены ошибка прямого угла $\Delta 90^\circ$, пирамидальность и погрешность δ_{45° . При установке призмы, например AP-90°, на один из катетов (рис. 10.13, а) можно получить значения δ_{45° и π .

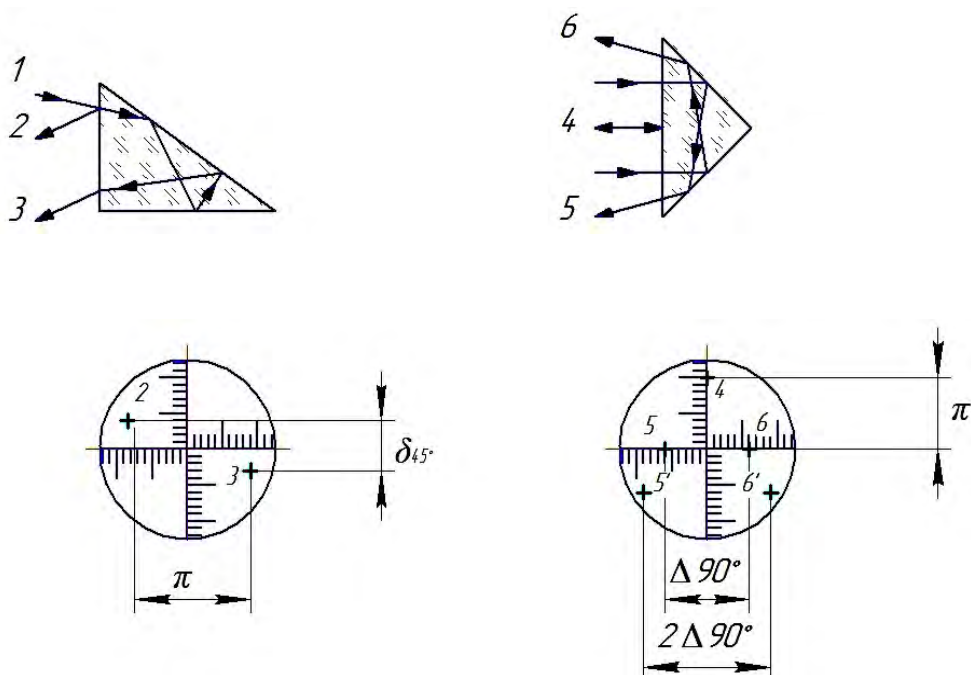


Рис. 10.13. Схема определения погрешностей δ_{45° и пирамидальности

Для измерения $\Delta 90^\circ$ призму необходимо установить на боковую грань (рис. 10.13, б). Тогда в поле зрения наблюдаются три основных блика 4, 5, 6, а также блики 5' и 6', пятикратно отраженные внутри призмы. При вращении столика с призмой блики 4', 5' и 6', как образованные при нечетном

числе отражений, будут перемещаться в горизонтальной плоскости, в то время как блики 5 и 6 будут неподвижными.

В случае контроля крыши крышеобразных призм ошибку угла крыши оценивают по величине двоения изображения перекрестия сетки коллиматора. Призма устанавливается на столик перед объективом коллиматора так, чтобы ход лучей через призму в процессе ее контроля совпадал с ходом лучей при работе призмы в приборе.

Проверка разрешающей способности призм выполняется на установке, приведенной на рис. 10.14. В фокусе объектива 4 коллиматора 3 устанавливается мишень 2, которая подсвечивается источником 1. Рассматривая изображение мишени в зрительную трубу 6, по последнему разрешаемому квадрату определяют разрешающую способность призмы 5. Квадрат считается разрешенным, если в нем можно различить все направления штрихов. Не допускаются двоение изображения, хвосты, большой фон.

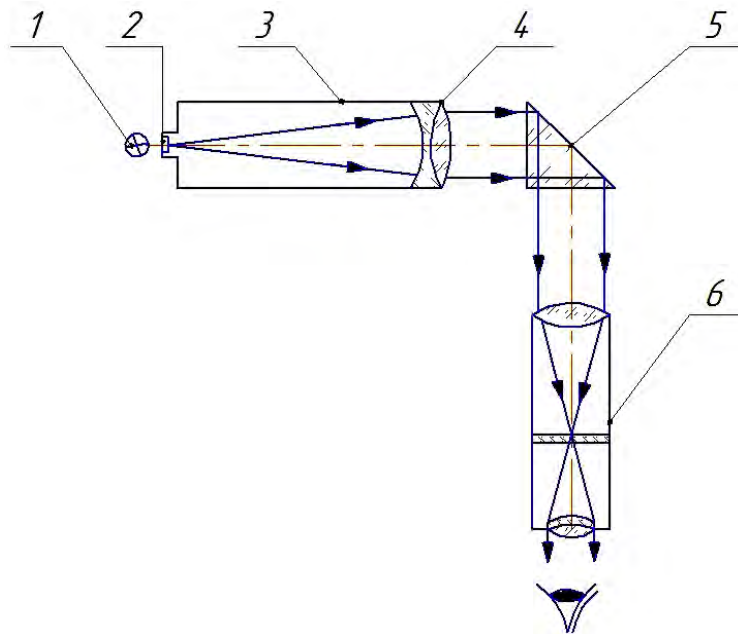


Рис. 10.14. Схема проверки разрешающей способности призм

Разрешающая способность призмы в тех случаях, когда она не задана в чертежах, но требуется в технологических целях как косвенная оценка точности поверхностей (N и ΔN), рассчитывается по формуле

$$\varphi'' = K \frac{120''}{\varnothing_{\text{св}}},$$

где K – коэффициент, равный 1,0 для призм с требованиями $N < 1$, $\Delta N \leq 0,1$; 1,1 – для призм с $N = 1-3$, $\Delta N = 0,2-0,5$; 1,2 – для призм с $N > 3$, $\Delta N > 0,5$;
 $\varnothing_{\text{св}}$ – световой диаметр (берется из чертежа).

10.4. Технология изготовления линз

10.4.1. Грубое и среднее шлифование линз

В зависимости от серийности выпуска продукции заготовками для производства линз служат прессовки или куски стекла. Прессовки применяют в массовом и серийном, а куски стекла – при единичном производстве.

Если заготовками для линз являются куски стекла, то на заготовительном участке они проходят ряд дополнительных операций, к которым относятся разметка, распиливание, шлифование сторон, склеивание в столбик, округливание, расклеивание и промывка. Если заготовками являются прессовки, то эти операции не выполняют.

Грубое шлифование линз выполняют поштучно или блоками, причем блоки шлифуют, как правило, на станках, а одиночки – как на станках, так и вручную.

При шлифовании вручную используют обдирочные станки модели СО и обработку ведут крупнозернистыми порошками в три перехода для крупных деталей из твердого стекла и в два перехода – для мелких деталей из мягкого стекла. Большое значение имеет радиус кривизны шлифовальников, который должен быть строго определенным для каждого номера абразивного порошка. При этом изменение радиуса кривизны шлифовальников по переходам должно быть таким, чтобы обеспечить обработку детали на каждом последующем шлифовальнике, начиная с краевой зоны. Последний переход выполняется микропорошком М28. Обработка каждым номером абразивного порошка должна обеспечивать полное сошлифовывание следов предшествующей обработки и образование матовой поверхности, свойственной применяемому абразивному материалу.

В качестве примера рассмотрим изменение радиуса кривизны комплекта инструмента (чашек) для обработки (шлифования) выпуклой поверхности линзы радиусом $R_0 = 48,42$ мм (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Комплект инструмента для шлифования выпуклой сферической поверхности $R_0 = 48,42$ мм

Тип инструмента и радиус кривизны, мм	Марка абразивного материала	Величина изменения радиуса по сравнению с R_0 , мм	Область применения
48,44	М10	0,02	Мелкое и среднее шлифование
48,47	М14	0,05	
48,51	М20	0,09	
48,56		0,14	Притирочный инструмент
48,62	М28	0,2	Грубое шлифование (обдирка)
48,82	№ 4	0,4	

Первой обрабатывается поверхность с меньшим радиусом, как имеющая более чистую (глянцевую) поверхность. При этом снимается наименьшая толщина, необходимая для удаления следов прессования и составляющая 0,3–0,7 мм. Затем обрабатывается сторона с большим радиусом кривизны (шамотная сторона).

Радиус кривизны детали периодически проверяют путем притирки к контрольному инструменту (притиру), а также сферометром или радиусным шаблоном. Ширина кольца притираемой зоны зависит от соотношения между радиусом R детали и ее диаметром D :

при $R : D < 1$ ширина кольца притираемой зоны детали должна занимать $1/6D$;

$R : D = 1-4$ – третью часть;

$R : D > 4$ – практически всю поверхность детали.

При обработке второй стороны линзы периодически проверяют ее толщину, чтобы не получить тонких деталей. Толщину двояковыпуклых линз проверяют штангенциркулем или микрометром. Остальные линзы контролируют рычажным или индикаторным толщиномером.

Цилиндрическую поверхность линзы периодически осматривают, и если обнаружится неравномерная толщина по краю, линзу шлифуют с нажимом на толстый край.

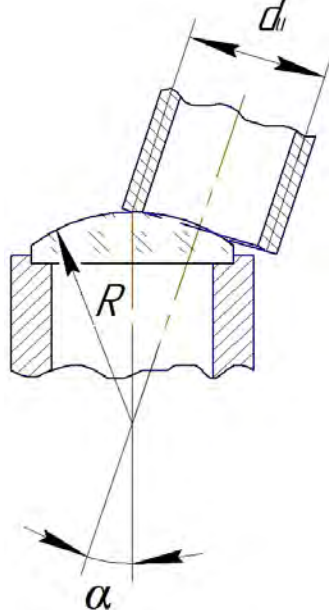


Рис. 10.15. К определению угла α

С целью механизации грубого шлифования линз используют сферошлифовальные станки моделей «Алмаз», АЛ, ШС и др.

В конструкции сферошлифовальных станков использован принцип образования сферы трубчатым (алмазным) инструментом, ось которого проходит через ось вращения детали и наклонена к ней под углом α . Из рис. 10.15 видно, что угол α связан с диаметром d инструмента и радиусом R обрабатываемой поверхности соотношением

$$\sin \alpha = \frac{d}{2R}.$$

После фрезерования деталей на станках иногда дополнительно проводят их подшлифовку вручную микропорошком М28.

10.4.2. Мелкое шлифование и полирование линз

Мелкое шлифование первой поверхности блока линз выполняют на станках модели ШП, в основном в два перехода, водными суспензиями микропорошков или алмазным инструментом. Зернистость микропорошков может быть М28 и М14 или М20 и М10. Алмазный инструмент, кото-

рый используется на данной операции, представляет собой чашку или грибок с наклеенными по определенному закону алмазонасными таблетками. Алмаз в таблетках может быть самых разных фракций.

Радиус кривизны поверхности блока после первого перехода контролируют по ширине зоны ее контакта (притирке) с поверхностью инструмента (шлифовальника) для второго перехода. После выполнения второго перехода радиус поверхности контролируют пробным стеклом по влаге или предварительно наносят на деталь тонкий слой воска (восковым карандашом наносят несколько мазков по поверхности детали, которые затем растирают салфеткой), накладывают пробное стекло и смотрят «цвет».

По окончании шлифования кривизна поверхности детали должна отличаться от заданной в среднем на два кольца. Так как обработку (шлифование и полирование) всегда начинают с краевой зоны, то очевидно, что при контроле всегда должна быть «яма». При шлифовании необходимо также добиваться максимального уменьшения местных ошибок (ΔN). При значительном отступлении от заданного радиуса кривизны (приблизительно три-четыре кольца) целесообразно перешлифовать поверхность заново.

Полирование ведут на тех же станках (модели ШП) водной суспензией полирита с применением смоляных полировальников. Марку полировочной смолы выбирают в зависимости от интенсивности процесса и температуры воздуха. Проконтролировав качество полированной поверхности (формы – с помощью РПС, чистоты – с помощью лупы 3^x), ее защищают лаком и блок направляют на разблокировку. (Поскольку при контроле с помощью РПС на линзу наносятся царапины, то на блок стараются наклеить заведомо бракованную деталь, по которой и контролируют «цвет». Если же такой линзы нет, то контроль кривизны проводят по одной и той же линзе на блоке). Разблокировку выполняют охлаждением блока в холодильных камерах с последующим съемом деталей с помощью деревянного молотка или ультразвука (сухая разблокировка).

После контроля толщины деталей их снова направляют на блокировку для последующего мелкого шлифования и полирования второй поверхности, которые выполняются на том же оборудовании.

Полностью обработав и разблокировав линзы, осуществляют их промывку. Эту операцию выполняют или вручную с помощью бензина (растворяют смолу) и ацетона (растворяют лак) и протирки салфетками, или же на ультразвуковых установках без применения ЛВЖ и протирки. Промывку наклеенных приспособлений проводят на специальном агрегате, который представляет собой четырехпозиционную установку карусельного типа. На крестовине установки закреплены четыре металлические корзины, в которые на первой позиции загружаются приспособления. На второй позиции происходит разогрев приспособлений в электропечи до температуры 250–400 °С. На третьей и четвертой позициях выполняют горячую предварительную (в растворе щелочи) и окончательную (в воде) промывку приспособлений.

10.4.3. Центрирование линз

Центрирование линз – это операция по совмещению геометрической и оптической осей линзы.

Децентричность C линзы возникает как результат накопленных погрешностей на всех предыдущих механических операциях ее изготовления. Операцию центрирования линз выполняют в два перехода:

1) совмещением оптической оси линзы с осью вращения шпинделя станка;

2) шлифованием цилиндрической поверхности линзы до ее заданного диаметра. При центрировании совмещение оптической оси линзы с осью вращения шпинделя станка выполняют тремя способами: по блику, по прибору и в самоцентрирующих патронах. Центрирование крупногабаритных линз производят в процессе их шлифования путем подгонки разнотолщинности (косины) Δt до допустимой чертежом величины. Пересчет на разнотолщинность линз по краю производят по одной из формул:

$$\Delta t = CD \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \quad \text{или} \quad \Delta t = \frac{CD}{f'(n-1)},$$

где C – минимальный допуск на центрирование, заданный чертежом, мм;

D – диаметр линзы, по которому измеряется разнотолщинность;

R_1 и R_2 – абсолютные значения радиусов кривизны;

f' – фокусное расстояние линзы;

n – показатель преломления стекла.

Центрировку линз по блику в основном применяют в единичном производстве, когда точность центрирования не превышает 0,02–0,1 мм. Операцию производят приклеиванием центрируемой линзы 3 смолой 4 к трубчатому патрону 5, закрепленному в шпинделе центрировочного станка (рис. 10.16).

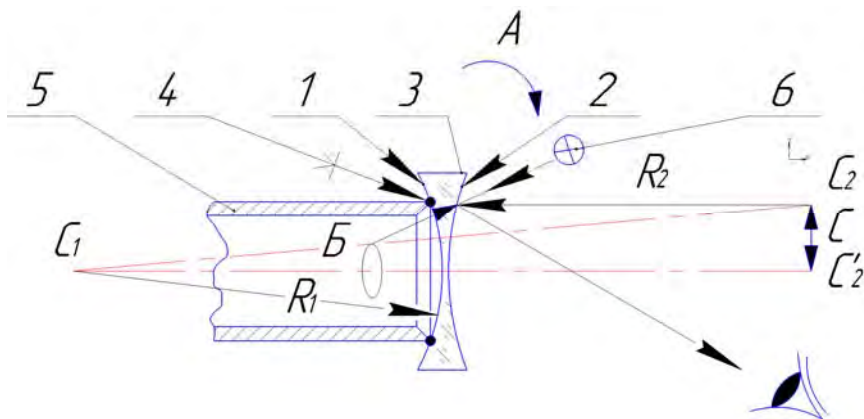


Рис. 10.16. Схема центрирования линз по блику

Поскольку центр кривизны C_1 поверхности 1 линзы, вплотную прижатой к опорной кромке патрона 5, автоматически оказывается на оси шпинделя центрировочного станка, то для совмещения с этой осью оптической оси C_1C_2 линзы последнюю необходимо смещать на патроне по стрелке А до совмещения центра кривизны C_2 второй поверхности линзы с точкой C'_2 . Смещение линзы производят при незатвердевшей смоле 4. Контроль за правильностью установки линзы осуществляют наблюдением за положением блика от источника света 6 на поверхности 2 детали или за его изображением, перемещающимся по кругу Б. Точность установки линзы увеличивается до 0,003 мм, если контроль биения проводится с помощью автоколлимационной трубки ЮС-13.

Перпендикулярность торца патрона 5 (см. рис. 10.16) оси шпинделя центрировочного станка проверяют прикладыванием к вращающемуся патрону смазанной маслом полированной плоскопараллельной пластинки. Изображения светящейся лампочки, получаемые от передней и задней поверхностей пластинки, должны быть неподвижны. Удобнее пользоваться пластинкой из темного стекла, дающей одно изображение.

Для наклеивания линзы патрон нагревают спиртовой или газовой горелкой, его конус и торец смазывают центрировочной смолой, содержащей шеллак, после чего к нему прижимают теплую линзу стороной с меньшим радиусом кривизны. Линзу нагревают в теплом потоке воздуха под пламенем горелки. После установки линзу охлаждают, выжимая над ней из губки теплую воду. Центрирование выполняют алмазным кругом. Скорость вращения детали устанавливают в зависимости от условий работы. Увеличенные скорости вращения применяют для линз малого диаметра, изготовленных из мягкого стекла и имеющих тонкие края.

Установку линз по прибору (по микроскопу) применяют для деталей с большими радиусами кривизны. Точность центрирования – порядка 10 мкм. Схема установки линзы по прибору показана на рис. 10.17. Предварительно на патрон 5 смолой наклеивают линзу 6 (линзы диаметром до 40 мм нагревают на электроплитке, а большего диаметра – в термостате; линзы нагревают до 50–60 °С; оправки нагревают на спиртовой или газовой горелке) и устанавливают его в посадочное отверстие стола 4 прибора. Подогревая смолу до размягчения, линзу передвигают по оправке 5 (по направлению стрелки А) и добиваются такого ее положения, когда при включенном источнике света 1 изображение сетки 2 коллиматора 3 совпадает с сеткой 8 микроскопа 7 или попадает между допусковых штрихов на сетке 8. При вращении оправки 5 в гнезде стола 4 изображение

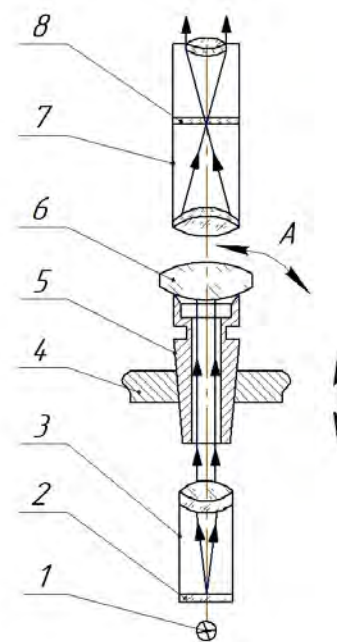


Рис. 10.17. Схема установки линз по прибору

сетки 2 не должно выходить за допусковое поле. Затем оправку 5 с линзой снимают с прибора и после остывания смолы (через 5–10 мин) повторно проверяют центрировку. Отцентрированную таким образом линзу и патрон устанавливают в зажиме шпинделя станка, на котором округливают линзу. Для этого применяют станки с ручной подачей инструмента.

Установку линз в самоцентрирующихся патронах осуществляют непосредственно на специальных станках модели ЦС, работающих с алмазным шлифовальным кругом в полуавтоматическом цикле. Центрируемую линзу 1 (рис. 10.18) зажимают в шпинделях станка, левый из которых является ведущим, а правый имеет осевое перемещение по стрелке А, и с помощью пружины прижимают линзу к левому шпинделю. На шпинделях закреплены стальные закаленные цилиндрические патроны 2 и 3, имеющие тонкие полированные рабочие кромки. Оси кромок патронов совпадают с осью вращения шпинделей. Биение кромок не должно превышать 1–2 мкм. Оба патрона вращаются в одну сторону.

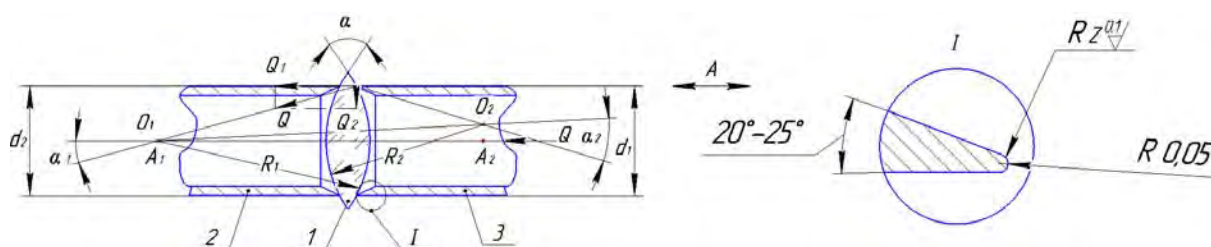


Рис. 10.18. Схема центрирования линз в самоцентрирующихся патронах

В начальном положении оптическая ось линзы O_1O_2 может быть смещенной относительно геометрической оси A_1A_2 патронов 2 и 3. Однако при зажиме шпинделей с силой Q на линзу будет действовать сила Q_2 , сдвигающая ее к оси вращения шпинделей до тех пор, пока деталь не коснется всей кольцевой поверхности патронов. Это произойдет автоматически в момент совмещения оптической оси линзы с осью шпинделей. Величина силы Q_2 зависит от кривизны поверхности линзы, характеризуемой углом сдвигания (зажима) α , образованным касательными к сферическим поверхностям в точке их контакта с патронами:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = \arcsin \frac{d_1}{2R_1} + \arcsin \frac{d_2}{2R_2}.$$

Опытным путем установлено, что линзы с углом зажима $\alpha \geq 45^\circ$ хорошо устанавливаются и центрируются с точностью до 0,005 мм. Линзы с углом зажима $45^\circ > \alpha > 25^\circ$ устанавливаются хуже и центрируются с меньшей точностью. Линзы с $\alpha < 20^\circ$ этим способом не центрируют.

После центрирования линзы направляют на фасетирование, промывку, просветление и склеивание.

Ф а с е т и р о в а н и е линз. Фаски на линзах по их назначению разделяют на технологические и конструктивные. Технологические предназначены для предохранения краев линзы от выколов во время обработки линзы. На чертеже готовой детали указывают только конструктивные фаски, а технологические фаски проставляют в технологических картах.

Технологические фаски наносят после грубого шлифования линз. В процессе дальнейшего шлифования они уменьшаются, а после центрирования полностью срезаются. Поэтому все виды конструктивных фасок наносят после центрирования линзы. В крупносерийном и массовом производстве линз операцию фасетирования иногда совмещают с центрированием, которое выполняют комбинированной фрезой на центрировочном станке. Поэтому режущая кромка фрезы имеет цилиндрическую и коническую части.

10.5. Контроль линз

10.5.1. Контроль формы поверхности контактными методами

Наиболее распространенный способ контроля формы оптических поверхностей состоит в измерении радиусов кривизны. Контроль чаще всего осуществляют контактным путем при помощи кольцевых сферометров и пробных стекол. В первом случае на диаметре d измеряют стрелку прогиба h (рис. 10.19) и сравнивают ее с расчетным значением h_0 , которое определяют по формуле

$$h_0 = R_0 - \sqrt{R_0^2 - \frac{d^2}{4}},$$

где R_0 – заданный радиус контролируемой сферической поверхности.

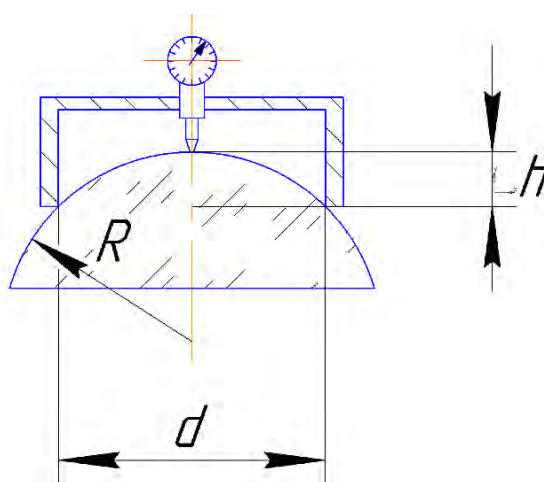


Рис. 10.19. Контроль радиуса кривизны с помощью кольцевого сферометра

Контроль при помощи сферометра имеет следующие недостатки:

- 1) опасность повреждения исследуемой поверхности;
- 2) возникновение погрешностей измерений в результате механических и тепловых деформаций деталей сферометра;
- 3) затруднения при определении ошибок, связанных с отклонением формы детали от сферической, и невозможность выявить локальные погрешности.

Преодоление последнего недостатка при одновременном повышении точности контроля достигается применением пробных стекол.

К недостаткам метода пробного стекла следует отнести:

- 1) опасность повреждения исследуемой поверхности при сопряжении с пробным стеклом;
- 2) погрешности, обусловленные неравномерным давлением и температурой, а также случайным попаданием пыли (загрязнений);
- 3) затруднения при сопряжении с пробным стеклом и наблюдении интерференционной картины в случае контроля микрооптики диаметром 1–3 мм;
- 4) необходимость содержания большого количества пробных стекол, зачастую равного утроенному числу радиусов кривизны;
- 5) затруднения при контроле поверхностей линз, завальцованных в оправы, т. е. на этапе, когда особенно важно выявить наличие возможных искажений оптических поверхностей напряжениями, возникшими при завальцовке;
- 6) невозможность контроля, возникающих в склейке искажений оптических поверхностей;
- 7) погрешности контроля крутых сферических поверхностей, возникающие вследствие того, что разные участки поверхности наблюдаются под разными углами.

Появление последней погрешности рассмотрим на примере контроля плоской оптической детали пробным стеклом (рис. 10.20).

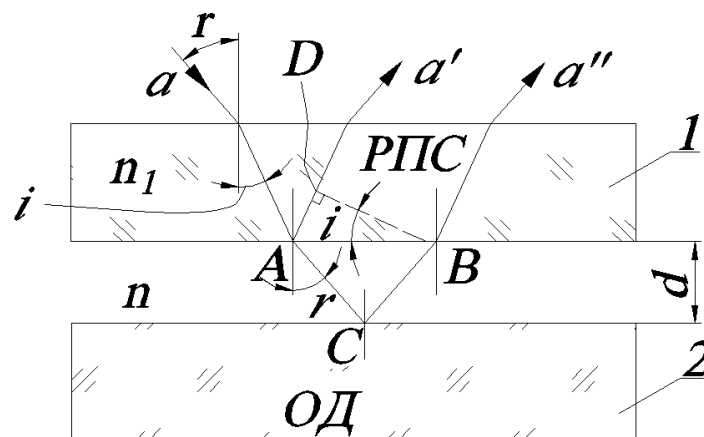


Рис. 10.20. К контролю формы поверхности пробным стеклом

При сопряжении пробного стекла 1 с деталью 2 между ними возникает воздушный промежуток толщиной d . Тогда разность хода Δ для интерферирующих лучей $a'-a''$ будет

$$\Delta = (AC + BC)n - ADn_1 + \lambda / 2, \quad (10.1)$$

где n и n_1 – показатели преломления воздуха и стекла соответственно;

$\lambda/2$ – слагаемое из-за скачка фазы при отражении излучения от границы «воздух–стекло» (в ряде случаев при использовании интерференционной картины для измерительных целей это слагаемое не учитывают).

Из рис. 10.20 видно, что $AC = CB = d/\cos r$, $AD = AB \sin i$, $AB = 2d \operatorname{tgr}$. Тогда $AD = 2d \operatorname{tgr} \cdot \sin i$. С учетом этих значений выражение (10.1) запишется как

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{2dn}{\cos r} - 2dn_1 \operatorname{tgr} \cdot \sin i = \frac{2dn}{\cos r} - 2dn_1 \frac{\sin^2 r \sin i}{\cos r \sin r} = \frac{2d}{\cos r(1 - \sin^2 r)} = \\ &= \frac{2d}{\cos r} \cos^2 r = 2d \cos r. \end{aligned} \quad (10.2)$$

Из соотношения (10.2) видно, что при изменении угла r изменяется разность хода Δ интерферирующих лучей и, следовательно, изменяется количество интерференционных колец (одному интерференционному кольцу соответствует $\Delta = \lambda / 2$). Это значит, что для правильного определения количества интерференционных колец наблюдение необходимо проводить перпендикулярно воздушному промежутку, что особенно актуально при контроле линз с крутым радиусом. В ряде случаев проверку таких поверхностей следует проводить по частям.

10.5.2. Контроль формы поверхности бесконтактными методами

А. Интерферометр с дифрагированной эталонной волной

Схема интерферометра с дифрагированной эталонной волной показана на рис. 10.21.

Интерферометр работает следующим образом. Пучок лучей от источника 1, прошедший через расширительный элемент 2, фокусируется в виде пятна рассеяния диаметром около 100 мкм на точечном отверстии 4 диаметром примерно 10 мкм в зеркальном покрытии наклонного зеркала 5. Точечное отверстие становится источником дифрагированной сферической волны, которая в автоколлимации от исследуемой сферической поверхности 6 изображается в виде пятна рассеяния, перекрывающего точечное отверстие 4. Отразившись от зеркала 5, эта рабочая волна направляется в сторону наблюдателя.

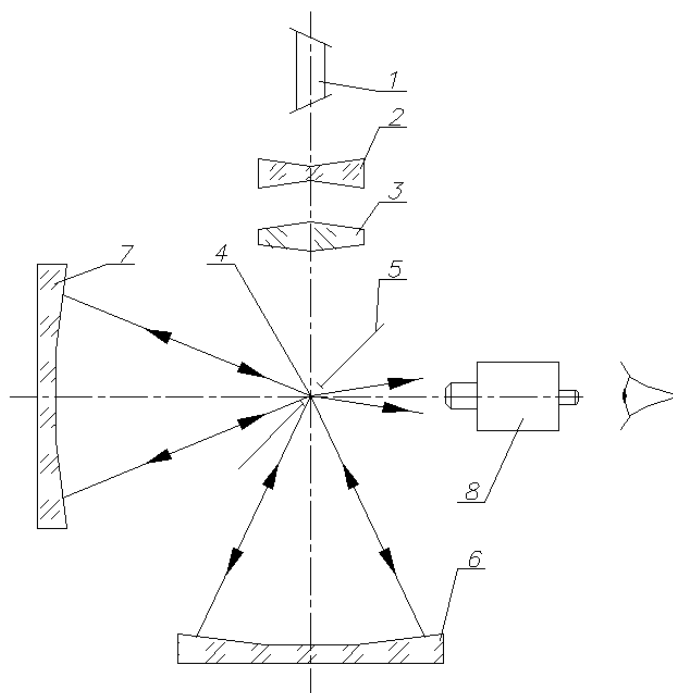


Рис. 10.21. Оптическая схема интерферометра с дифрагированной эталонной волной

Часть излучения источника, сфокусированного объективом 3 на точечное отверстие, но не прошедшего через него, отражается от зеркала 5 в направлении сферического зеркала 7 и, отразившись от него, фокусируется на отверстии 4. При этом на отверстии формируется вторая дифрагированная сферическая волна, которая используется в качестве опорной. В результате сложения этой волны с рабочей возникает интерференция, несущая информацию о форме контролируемой поверхности 6. Особенность рассмотренного варианта схемы интерферометра состоит в том, что он является полностью безэталонным, так как в нем не содержится ни одной эталонной оптической поверхности, а также отсутствуют поверхности, погрешности изготовления которых входят в погрешности измерения.

При наличии в схеме контроля значительных вибраций используют телевизионную систему. Для устранения влияния вибраций наблюдают и расшифровывают изображение неподвижной интерферограммы, воспроизводимое с одиночного кадра.

Б. Интерферометр с эталонной фронтальной поверхностью

Схема интерферометра показана на рис. 10.22. При использовании интерферометра необходимо обеспечить интерференцию лучей, отраженных от эталонной поверхности А элемента 7 и контролируемой поверхности Б линзы 8. Для этого в пространстве между объективом 6 и элементом 7 должно произойти наложение упомянутых лучей, что возможно в случае, когда они идут по одному и тому же следу. Данное требование реализуется только для лучей, падающих на поверхности А и Б по нормальям. Следова-

тельно, необходимо определенное расположение элемента 7 относительно объектива 6 и контролируемой детали 8 относительно элемента 7. Для выяснения этого расположения проанализируем схему интерферометра.

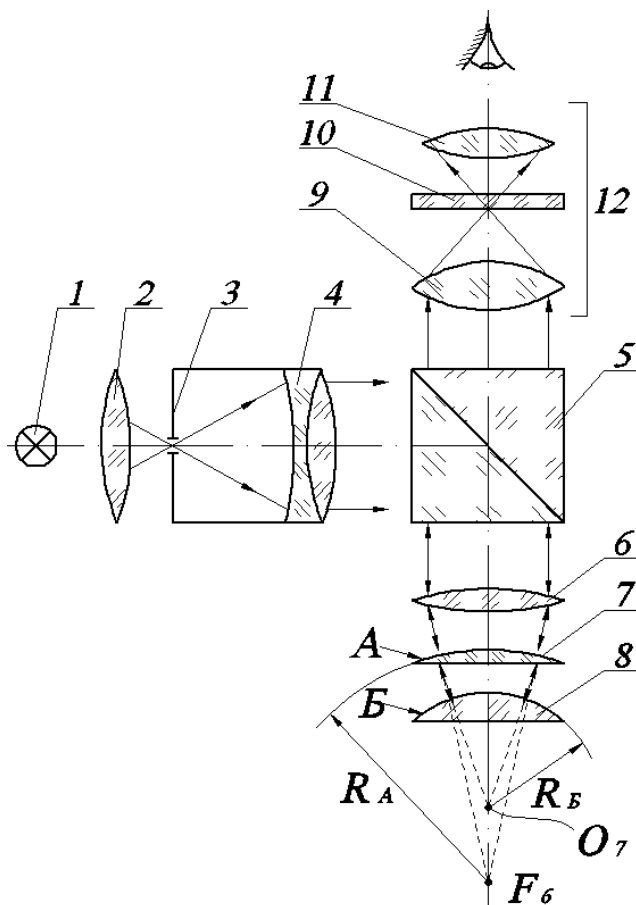


Рис. 10.22. Оптическая схема интерферометра с эталонной фронтальной поверхностью

Пучок лучей от источника 1 после конденсора 2 проходит точечную диафрагму 3 и параллельным пучком выходит из объектива 4 коллиматора. Отразившись от полупрозрачной грани призмы-куба 5, излучение направляется в объектив 6 и собирается в его фокусе, с которым совмещен центр кривизны эталонной сферической поверхности радиусом R_A стекла 7. При этом деталь 8 устанавливают так, чтобы центр кривизны контролируемой ее сферической поверхности Б радиусом R_B совпадал с точкой O_7 фокусирования лучей стеклом 7. Лучи, отраженные от эталонной поверхности стекла 7 и от контролируемой детали, интерферируют между собой. Объективом 9 эта интерференционная картина проецируется в плоскость сетки 10 и рассматривается через окуляр 11 зрительной трубы 12.

10.5.3. Контроль центрировки

Для проверки точности центрировки линз наибольшее распространение получили оптические приборы двух типов:

1) коллимационные приборы, работающие по принципу измерения биения изображения светящейся марки, образованной лучами, прошедшими через вращаемую деталь;

2) автоколлимационные приборы, позволяющие измерять биение изображения светящейся марки, образованной лучами, отраженными от вращаемой детали.

Оптическая схема коллимационного прибора изображена на рис. 10.23.

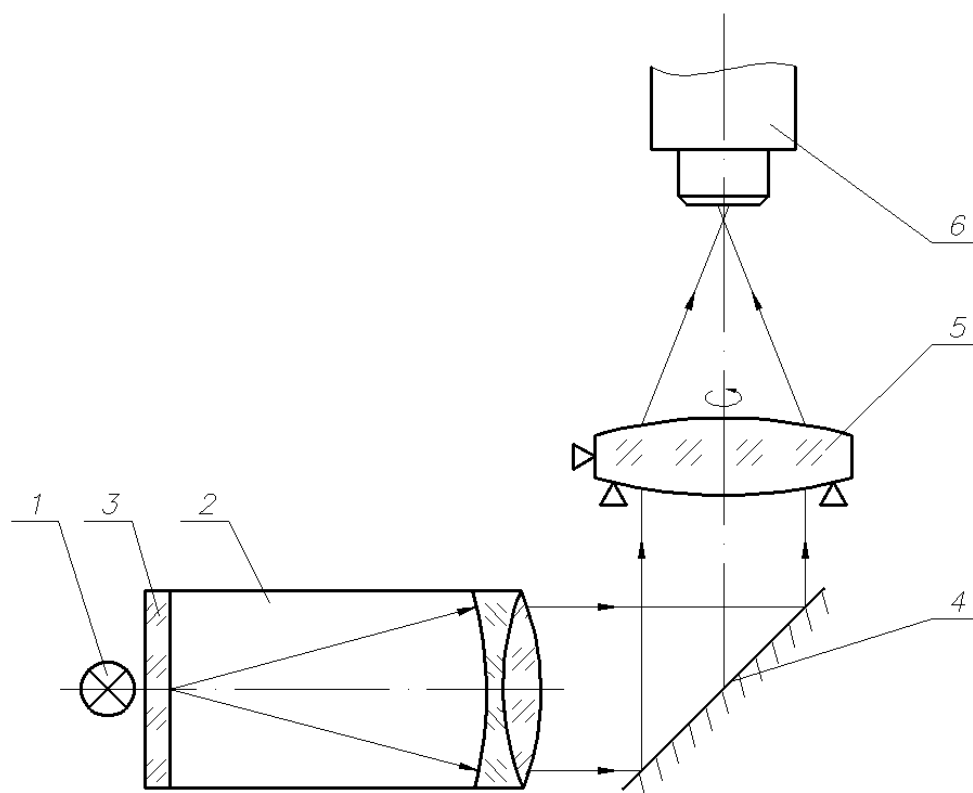


Рис. 10.23. Оптическая схема коллимационного прибора для контроля центровки линз

Излучение от источника света *1* проходит через коллиматор *2*, в фокальной плоскости которого установлена сетка *3* в виде перекрестия, и после отражения от зеркала *4* параллельным пучком попадает на контролируемую линзу *5*. Диаметр окружности, описываемой изображением перекрестия коллиматора при вращении линзы *5*, представляет собой удвоенную децентрировку, которую наблюдают через микроскоп *6*.

Оптическая схема автоколлимационного прибора (автоколлимационной трубки ЮС-13) приведена на рис. 10.24, *a*.

Прозрачное перекрестие на зеркале *8* трубки, подсвеченное осветителем *7*, проецируется объективом *2* в точку автоколлимации поверхности линзы *1*. Отраженные от этой поверхности лучи возвращаются в трубку и образуют увеличенное изображение перекрестия зеркала *8* на измерительной сетке *4* микроскопа *3*.

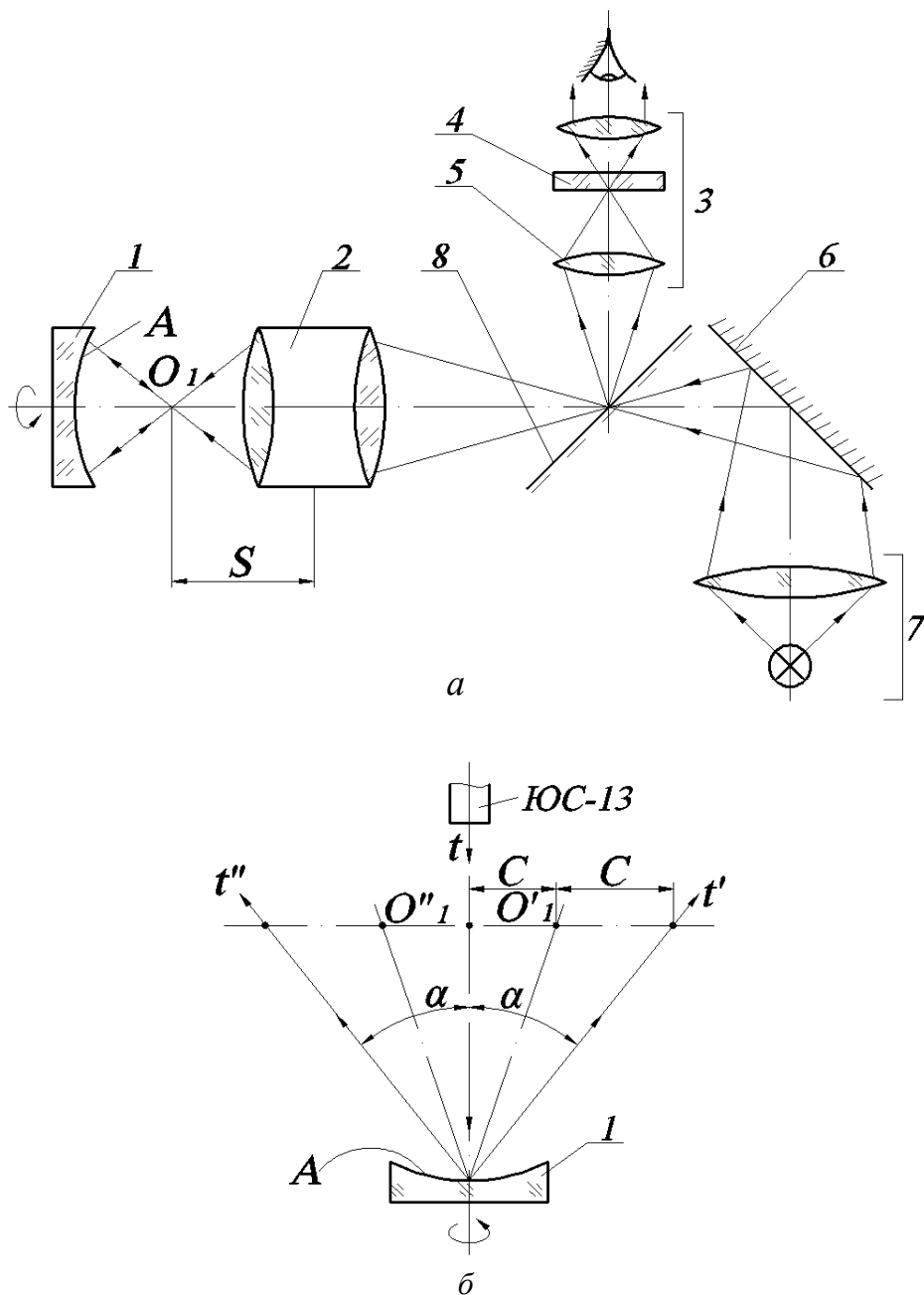


Рис. 10.24. Оптическая схема автоколлимационного прибора для контроля центрировки линз

Наблюдение за децентрировкой C линзы I ведут при ее вращении вокруг оси. Схема наблюдения показана на рис. 10.24, б. Осевой луч t пучка, выходящего из трубки ЮС-13, из-за смещения центра кривизны O'_1 контролируемой поверхности A отражается от линзы по направлению t' . При повороте линзы на 180° центр кривизны поверхности A займет положение O''_1 и осевой луч t отразится по направлению t'' . В результате изображения перекрестия трубки, образуемое отраженными лучами $t'-t''$, описывает на сетке микроскопа окружность, диаметр D которой соответствует N делениям сетки и определяется по формуле

$$D = 4C\beta_{об}\beta_{м} = mN, \quad (10.3)$$

где C – децентрировка контролируемой линзы;
 $\beta_{м}$ – линейное увеличение объектива 5 микроскопа 3;
 $\beta_{об}$ – линейное увеличение объектива 2 трубки;
 m – цена деления сетки микроскопа, мм.
 Из формулы (10.3) следует, что величина децентрировки

$$C = \frac{m}{4\beta_{об}\beta_{м}} N.$$

Перемещая объектив 2 в тубусе, изображение перекрестия трубки можно поместить практически на любом расстоянии S от торца тубуса объектива. Величина S лежит в пределах от -5 см до $-\infty$ и от $+\infty$ до $+5$ см, что позволяет наблюдать автоколлимационные блики от поверхностей линз с радиусами любой величины. При этом изменяется увеличение $\beta_{об}$.

Для удобства определения децентрировки C на тубусе трубки нанесена шкала величины

$$\kappa = m/4 \beta_{об} \beta_{м},$$

выраженной в микрометрах, для разных положений объектива 2 в тубусе. Определив по сетке трубки число делений N , занимаемых диаметром окружности биения автоколлимационного блика от поверхности линзы, определяют децентрировку по формуле

$$C = \kappa N.$$

10.6. Соединение оптических деталей

10.6.1. Склеивание

Общими требованиями, которые предъявляются к неразъемному соединению оптических деталей, являются сохранение оптических свойств деталей, минимальные деформации поверхностей после соединения, обеспечение необходимой механической прочности, термо- и влагостойкости, химической стойкости. При выборе клеящего вещества и проведения техпроцесса склеивания необходимо учитывать, что затверждение клея, сопровождающееся усадкой, не вызывает деформации или искажения склеиваемых деталей в том случае, если затверждение протекает при постоянной или медленно изменяющейся температуре. Склеивание деталей без деформаций возможно проводить также и клеем, отвердевающим при комнатной температуре.

Техпроцессу склеивания линз предшествует их попарная комплектация по N и по толщинам с учетом толщины слоя клея. Толщину клея не контролируют, а обеспечивают в пределах 0,005–0,015 мм.

Комплектация линз снижает суммарную погрешность толщин склеиваемых линз и тем самым обеспечивает получение заданных значений фокусных отрезков и качества изображения.

Соединяемые поверхности попарно скомплектованных линз чистят, удаляют пыль и ворсинки, накладывают одну на другую, осматривают в проходящем свете и комплектами устанавливают на выставленную по горизонтали плоскость. Если применяемый клей требует нагрева деталей, то последние устанавливают парами на электроплиту или в термостат, а клей нагревают в пробирке, которую помещают в глицериновую ванну, нагретую до определенной температуры. Перед склеиванием положительную линзу снимают с отрицательной, на поверхность наносят каплю клея и накладывают на нее положительную линзу. Затем линзы переносят на чистый черный бархат и деревянной рукояткой с пробковым наконечником накладывают на верхнюю линзу, которую при этом слегка вращают и перемещают, удаляя пузырьки воздуха и избыток клея. Склеенные линзы устанавливают на прибор для проверки центрирования линз и перемещением положительной линзы по отрицательной добиваются совмещения их оптических осей (предварительное центрирование). После этого детали устанавливают на электроплиту, где выдерживают 10–15 мин при температуре 80–90 °С, и повторно просматривают на приборе, устраняя децентрировку линз (окончательное центрирование). Излишки клея с цилиндрической поверхности склеенных линз удаляют лезвием и протирают салфеткой, смоченной органическим растворителем.

Центрированные линзы помещают в термостат для полимеризации (затвердевания) клея, где их выдерживают в течение 8–10 ч при температуре 50–55 °С.

Трехлинзовые сборки склеивают в два приема. Вначале склеивают две линзы, а после полной полимеризации клея и подготовки склеиваемых поверхностей приклеивают третью линзу.

Расклеить линзы до наступления полной полимеризации клея можно путем их нагрева до 100–140 °С. После полной полимеризации клея линзы расклеивают нагревом в глицериновой ванне при температуре 230–240 °С в течение нескольких часов. Однако такое разъединение связано с риском порчи деталей, особенно сделанных из флинтových стекол. Механическую расклейку ножом из мягкой стали применяют для линз из прочного стекла и с тупыми фасками, но при этом на отрицательных линзах могут образоваться выколки. Применяется также термический способ разъединения, при котором склеенные линзы быстро охлаждают, помещая их в жидкий азот. В результате разницы ТКЛР происходит разъединение деталей. Такое связано с риском порчи деталей.

Имеются клеи, которыми склеивают оптические детали непосредственно при комнатной температуре, но после этого для ускорения полимеризации предварительно отцентрированные линзы нагревают до 70–90 °С

и выдерживают в течение 10–15 мин. Во время полимеризации производят контроль центрирования. Клей полностью полимеризуется в течение 24–48 ч при комнатной температуре.

Призмы и пластины склеивают так же, как и линзы. При этом призмы склеивают в приспособлении, позволяющем установить их в нужном положении. Проверка правильности склейки производится на специальных контрольно-юстированных (КЮ) приборах. Полимеризацию клеящего слоя осуществляют в этом же приспособлении.

Если по ТУ требуется защита клеевых соединений от атмосферного воздействия, то место склейки таких деталей по периметру защищают клеем ОК-46 или акриловым. Для гашения бликов и отраженных лучей на нерабочие поверхности наносят черный матовый лак.

Нарушение технологического процесса склеивания может привести к расклейкам в виде звездочек, пузырьков, точек, трещин, пятен, дубовых листочков и к нарушению чистоты клеевого соединения в виде пылинок и ворсинок. Расклейки появляются из-за плохой чистоты клеевого соединения, а также воздействий механических усилий, промывочных жидкостей, перепадов температур и других факторов.

Для контроля чистоты клеевого соединения и обнаружения расклеек детали подсвечивают в торец и просматривают невооруженным глазом или с помощью лупы \times на темном фоне.

Из-за натяжений в клеящем слое или нарушений режимов сушки могут возникать дефекты формы поверхностей, которые контролируются с помощью пробного стекла или по разрешающей способности (при наличии дефектов формы поверхностей разрешающая способность блока ухудшается).

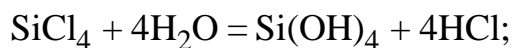
10.6.2. Соединение методом глубокого оптического контакта

Соединение оптических деталей под действием сил молекулярного сцепления, упрочнения термической обработкой или облучением инфракрасными (ИК) лучами называют *глубоким оптическим контактом* (ГОК). ГОК – неразъемное соединение, прочность которого близка к прочности материалов самих оптических деталей.

Технологический процесс соединения методом ГОК сводится к следующему.

Сначала на контактируемую поверхность одной из соединяемых деталей наносят пленку двуокиси кремния толщиной 130–150 нм. Пленка в зависимости от материала соединяемых деталей образуется или травлением в азотной кислоте, или гидролизом паров четыреххлористого кремния. Сущность последнего метода заключается в том, что в присутствии влажного воздуха пары четыреххлористого кремния (SiCl_4) гидролизуются, образуя ортокремниевую кислоту в дисперсном состоянии. Постепенно отдавая воду и адсорбируясь на поверхности детали, они образуют про-

зрачный слой двуокиси кремния. Уравнение реакции можно записать в следующем виде:



Осажденную пленку сушат при температуре 100 °С в течение 0,5 ч или в этиловом спирте в течение 10–15 мин и детали соединяют методом оптического контакта по обычной технологии. Для упрочнения оптического контакта до монолита соединенный узел подвергают термической обработке при температуре 250 °С в течение 8 ч или облучают инфракрасными излучателями с последующим охлаждением блока (вместе с печью).

Поверхности деталей, подлежащие соединению ГОК, должны быть изготовлены с точностью $N \leq 0,5$, $\Delta N \leq 0,1$. Допускается обработка соединяемых поверхностей деталей с $N > 0,5$, но противоположными по знаку значениями. Метод ГОК – трудоемкий.

10.7. Изготовление пробных стекол

10.7.1. Изготовление сферических пробных стекол

Сферические основные пробные стекла (ОПС) всех радиусов изготавливают парами, состоящими из выпуклого (+) и вогнутого (–) стекол. Контрольные пробные стекла (КПС) и рабочие пробные стекла (РПС) всех радиусов изготавливают только одного знака: радиусы КПС соответствуют кривизне контролируемой детали, радиусы РПС имеют противоположный знак.

В зависимости от значения радиуса кривизны применяют разные технологические процессы изготовления основных пробных стекол.

В частности, выпуклые ОПС радиусом от 0,5 до 37,5 мм изготавливают по технологии обработки выпуклых стекол, имеющих толщину $H = 1,2r$. По этой технологии измерения радиуса r проводят косвенно, как половину диаметра D шарика.

ОПС шлифуют на станках модели ШП вручную, поштучно на чугунных и латунных шлифовальниках, расположенных снизу, с применением абразивных суспензий.

В качестве наклеечных приспособлений применяют деревянные ручки, которые приклеивают к нерабочей стороне заготовок. Мерительным инструментом на стадии предварительной обработки служат радиусные шаблоны, а на завершающей – скобы, микрометры и другие измерительные устройства, которыми измеряют диаметр шарика.

Процесс шлифования выпуклых поверхностей толщиной больше полусферы имеет следующую особенность: при обработке необходимо постоянно подрезать центральную зону шлифовальника. Невыполнение этого

требования приводит к усиленному съему припуска с заготовки на ее вершине (особенно после подачи абразивной суспензии), в результате чего образуется деформированная (сплюснутая) сфера.

ОПС радиусом свыше 37,5 мм изготавливают парами одновременно. Грубое шлифование выполняют на чугунных шлифовальниках поштучно вручную на станках ШП. Контроль радиусов осуществляют шаблонами. Тонкое шлифование заготовок выполняют попарно: стекло на стекле. В качестве шлифовальника на шпиндель станка попеременно закрепляют то выпуклое, то вогнутое стекло. При этом у нижней заготовки края срабатываются быстрее, чем середина, а у верхней середина срабатывается быстрее, чем край. Умелое использование этой закономерности позволяет целенаправленно изменять значения r притирающихся поверхностей. Контроль значений r ведут на сферометре поочередным измерением стрелки h обоих стекол с последующим расчетом r .

В процессе полирования, которое выполняется по обычной технологии, r контролируют посредством сопряжения выпуклого и вогнутого стекол. Половина измеренной ошибки устраняется последующим полированием, например, первого стекла. При этом роль пробного выполняет второе стекло. Затем, используя в роли пробного первое стекло, полированием второго стекла устраняют оставшуюся часть ошибки сопряжения.

Контрольные и рабочие пробные стекла изготавливают по обычной технологии с контролем КПС по ОПС, а РПС – по КПС.

Изготовленные пары пробных стекол, находясь в сопряжении друг с другом в течение нескольких часов, изменяют вид интерференционной картины. Как правило, маленькая яма переходит в большую, а маленький бугор – в небольшую яму. Это явление есть результат действия упругих сил в деталях, которое зависит от многих факторов (жесткости конструкции пробного стекла, физико-механических свойств материала, величины и распределения остаточных напряжений и др.). Поэтому в процессе изготовления ОПС заведомо вводится соответствующая поправка, учитывающая возможное изменение интерференционной картины после отстоя.

10.7.2. Изготовление плоских пробных стекол

Плоские ОПС изготавливают путем последовательной подгонки трех стекол. Для получения точных плоских поверхностей одно стекло (например первое) принимают за эталонное, подгоняя к нему второе и третье стекла (рис. 10.25, *а* и *б*). Если стекло 1 имеет «яму», например, в одну полосу, то стекла 2 и 3 будут иметь «бугор» также в одну полосу. При сопряжении стекол 2 и 3 общий «бугор» составит две полосы (рис. 10.25, *в*). Обработывая стекла 2 и 3, их общую выпуклость уменьшают до одной полосы. После этого, приняв за эталон последовательно второе и третье стекло, подгоняют к нему два других, и так продолжается до тех пор, пока не получатся три точные плоскости.

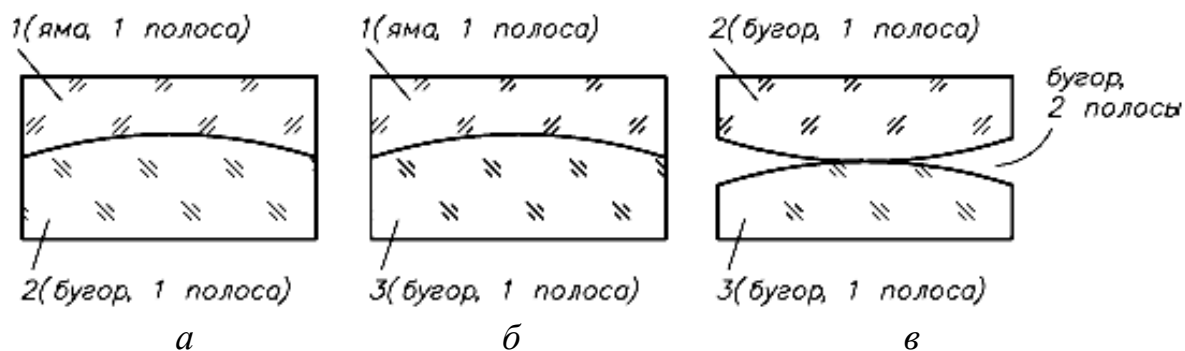


Рис. 10.25. Последовательность изготовления плоских эталонных стекол

Пробные стекла являются одним из видов гладких калибров и служат для хранения (ОПС), воспроизведения (КПС) и измерения (РПС) радиусов сферических поверхностей.

В серийном и массовом производстве, когда расход РПС велик, для наилучшей сохранности ОПС применение КПС обязательно. В единичном и мелкосерийном производстве допускается применение двухступенчатой системы: ОПС–РПС.

Глава 11. ИЗГОТОВЛЕНИЕ АСФЕРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

11.1. Параметры асферических деталей

Существуют следующие параметры асферических деталей (рис. 11.1):

1. Наружный $D_c = 2y_c$ и внутренний $D_n = 2y_n$ световые диаметры.
2. Вид уравнения асферической поверхности и ее знак, например: выпуклые и вогнутые параболоиды $y^2 = 2px$; эллипсоиды $y^2 = 2px - qx^2$; гиперболоиды $y^2 = 2px + qx^2$ (поверхности второго порядка); асфероиды типа $x^n y^n = 2px + qx^3 + S_3x_3 + S_4x^4 + \dots + S_nx^n$ или типа $y^{2n}x = t_2y^2 + t_4y^4 + \dots + t_{2n}y^{2n}$ (поверхности высших порядков); знакопеременные поверхности типа Шмидта (поверхности с точками перегиба); цилиндры, конусы, торы и др. При отсутствии уравнения поверхности она может быть задана координатами своих точек.

3. Крутизна, измеряемая углом φ_c между касательными к образующей в вершине асферической поверхности и в точке наружного светового диаметра (точка C на рис. 11.1).

4. Точность асферизации:

1) по местным ошибкам: угловое отклонение α нормали к фактической поверхности от расчетной в некоторой зоне или линейное отклонение фактической поверхности от расчетной в долях длины волны λ (ΔN в зоне шириной Δy);

2) по общим ошибкам: допуски на параметры (коэффициенты) уравнения поверхности ($\delta_P, \delta_q, \delta_{S_i}, \delta_{t_i}$) в процентах.

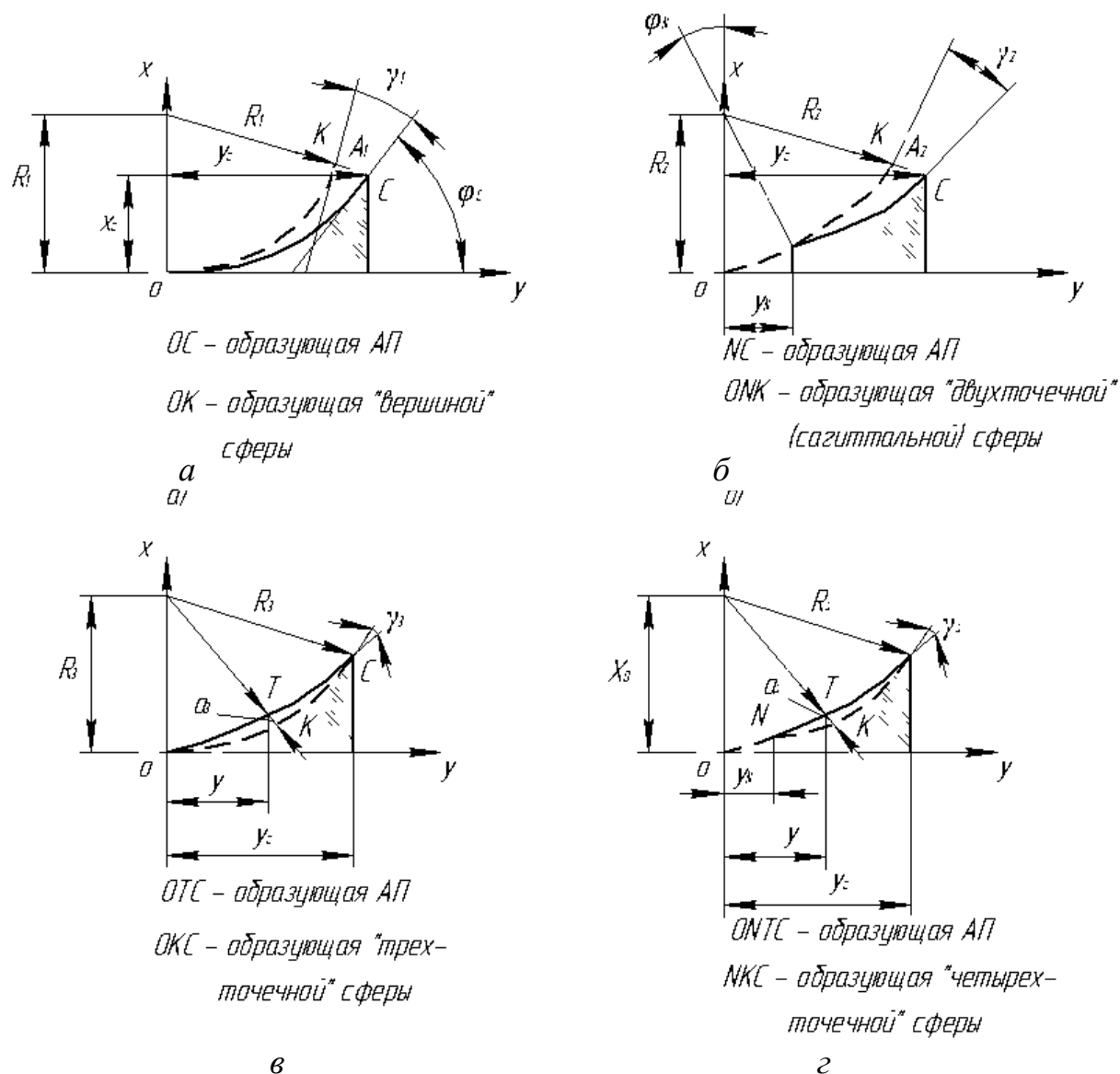


Рис. 11.1. Параметры асферических деталей

5. Асферичность:

1) *вершинная* A_1 – наибольшее отступление данной асферической поверхности от соприкасающейся с ней в ее вершине сферы, радиус которой R_1 равен радиусу кривизны асферической поверхности при ее вершине (рис. 11.1, *а*);

2) для кольцевых и внеосевых деталей вычисляют *сагиттальную асферичность* A_2 – наибольшее отступление данной асферической поверхности от соприкасающейся с ней в точке меньшего светового диаметра сферы, радиус R_2 которой равен сагиттальному радиусу кривизны асферической поверхности в указанной точке (рис. 11.1, *б*);

3) асферичность относительно ближайшей сферы: «трехточечная» асферичность a_5 , мм, – отступление асферической поверхности от сферы, проходящей через ее вершину и точку светового диаметра (для сплошных поверхностей, рис. 11.1, в) и «четырёхточечная» асферичность a_4 , мм, – отступление от сферы, проходящей через точки внутреннего и внешнего световых диаметров (для кольцевых и внеосевых деталей, рис. 11.1, г), причем $a_{3,4}$ – соответствующие наибольшие отступления.

6. Градиент асферичностей γ_i – наибольшее изменение соответствующей асферичности в некоторой точке. С геометрической точки зрения γ_i представляет собой угол между касательными к асферической поверхности и к соответствующей сфере в данной точке.

7. Конструктивные особенности деталей. По этому показателю различают детали: кольцевые и сплошные соосные, внеосевые, зеркала и линзы.

Чем больше асферичность, тем больше требуется технологических переходов, труднее обработка и меньше надежность в получении поверхности с заданной точностью. Наиболее технологичны профили поверхностей, которые приближаются к ближайшей сфере или плоскости с наименьшими отступлениями. Отражающие поверхности должны обрабатываться в четыре раза точнее аналогичных преломляющих поверхностей. Поверхности, имеющие профили с перегибами, или крутые обрабатывать и контролировать трудно, поэтому они нетехнологичны.

11.2. Правила выполнения чертежей оптических деталей с асферическими поверхностями

Чертежи асферических деталей должны содержать следующие наиболее важные, как подлежащие контролю, так и справочные, технологические показатели:

1. Точности асферизации по местным и общим ошибкам.
2. «Вершинную» A_1 или сагиттальную A_2 асферичности, а также градиенты данных асферичностей (γ_1 или γ_2).
3. Отступление $a_{3,4}$ асферической поверхности от ближайшей сферы радиуса $R_{3,4}$ для 10–20 зон детали с указанием радиуса $R_{3,4}$.
4. Крутизну поверхности по световому диаметру φ_c .
5. Для асферических поверхностей, изготавливаемых с погрешностью $\alpha \leq 3'$ (кроме вогнутых параболоидов и эллипсоидов), на чертеже следует указывать допускаемый размер кружка наименьшего рассеяния $D_{кр}$, мм, дополняя его методикой расчета или соответствующей схемой контроля этого кружка.

11.3. Способы формообразования асферических оптических деталей

11.3.1. Вакуумное моллирование

Оптические детали, имеющие асферические поверхности (АП) низкой точности, изготавливают принудительным вакуумным моллированием из плоских полированных стеклянных заготовок.

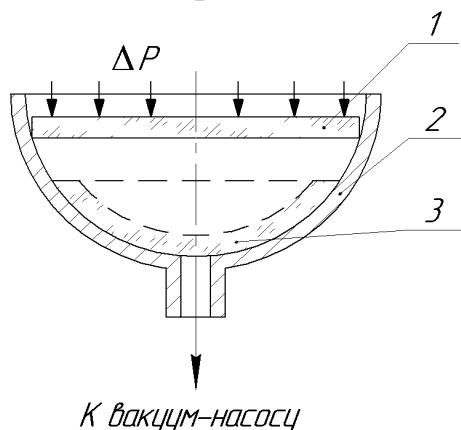


Рис. 11.2. Схема вакуумного моллирования асферических деталей

Круглые заготовки 1 (рис. 11.2) из полированного стекла нагревают в форме 2, имеющей профиль необходимой АП, до температуры начала пластической деформации. После создания вакуума под заготовкой она просаживается в форму 2 под действием избыточного давления Δp , принимая ее конфигурацию.

Нагрев заготовки 1 до температуры начала пластической деформации стекла позволяет получить деталь 3, на поверхности которой не отпечатываются микронеровности рабочей поверхности инструмента 2. Такая деталь не требует дальнейшей механической обработки.

11.3.2. Вакуумная асферизация

Данный метод применяется для получения АП с малым отступлением от ближайшей сферы или плоскости. Метод основан на нанесении на исходную сферическую или плоскую полированную поверхность подложки асферизирующего слоя неодинаковой толщины. Этим способом можно изготавливать поверхности любого порядка, но максимальная толщина наносимого слоя не может быть больше 10–15 мкм, так как прочность сцепления слоя со стеклом резко уменьшается с увеличением толщины первого.

Для образования АП на стеклянной подложке используют испаритель и маску, расположенную между ним и подложкой, асферизирующие слои (монооксид кремния, сернистый цинк и др.) наносят в вакуумной установке на вращающуюся с небольшой скоростью подложку.

Геометрию фасонных вырезов маски (рис. 11.3) рассчитывают в зависимости от требуемого распределения толщины асферизирующего вещества по круговым зонам подложки. Маску изготавливают фотогальваническим способом из латунной фоль-

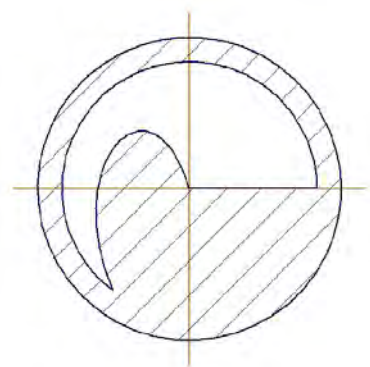


Рис. 11.3. Маска для вакуумной асферизации

ги толщиной порядка 0,05 мм. Деталь (или маска) вращается, и за счет фасонного выреза обеспечивается изменение толщины наносимого слоя по зонам АП. В процессе испарения толщину слоя косвенно контролируют фотометрическим устройством. Погрешность t наносимого слоя составляет в среднем 0,1 мкм.

На точность и воспроизводимость вакуумной асферизации большое влияние оказывают соосность вращаемой заготовки, маски и испарителя, а также симметричность молекулярного пучка в пределах необходимого телесного угла. Последнее обеспечивается покрытием испарителя диафрагмой с круглым отверстием диаметром около 10 мм.

11.3.3. *Обработка упругим лепестковым инструментом*

Упругий инструмент представляет собой круглую пластину переменного сечения с радиальными прорезями (рис. 11.4).

Жесткость инструмента рассчитана так, чтобы усилие, приложенное к центру инструмента, передавалось на обрабатываемую поверхность неравномерно в соответствии с распределением припуска на детали и выравнивалось при достижении требуемой асферической формы поверхности. Методика расчета упругого инструмента основывается на том, что при достижении полного контакта обрабатываемой поверхности и инструмента форма поверхности будет требуемой и величина давления по всей поверхности одинакова. Широкое применение способа ограничено сложностью расчета и изготовления инструмента.

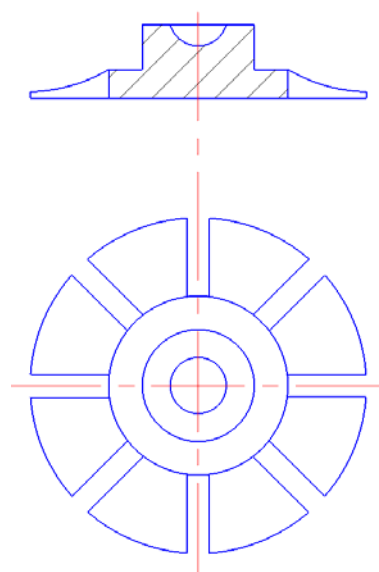


Рис. 11.4. Лепестковый инструмент для асферизации

11.3.4. *Обработка способом линейного соприкосновения (обработка ножевым инструментом)*

Соприкосновением по линии называют такой способ, при котором инструмент и заготовка в процессе обработки контактируют по узкой полоске – линии. Этим способом производят шлифование и полирование с отступлением от заданной сферической поверхности до 150 мкм.

Обработку ножевым инструментом применяют для получения выпуклых и вогнутых АП второго порядка. Схема обработки параболической поверхности изображена на рис. 11.5. Она основана на свойстве параболоида вращения давать в сечениях, параллельных оси вращения, параболу одного и того же уравнения. Заготовка 1, наклеенная на наклеечное приспособление 4 и первоначально имеющая сферическую поверхность, вращается вокруг оси. Инструмент (нож) 2, представляющий собой тонкую

пластинку из стали, латуни или оргстекла, перемещается возвратно-поступательно со скоростью около 30 дв. ход/мин параллельно самому себе и оси вращения заготовки. Соприкосновение заготовки и инструмента происходит по линии. Для сохранения первоначального профиля ножа 2 применяется сменная металлическая лента 3.

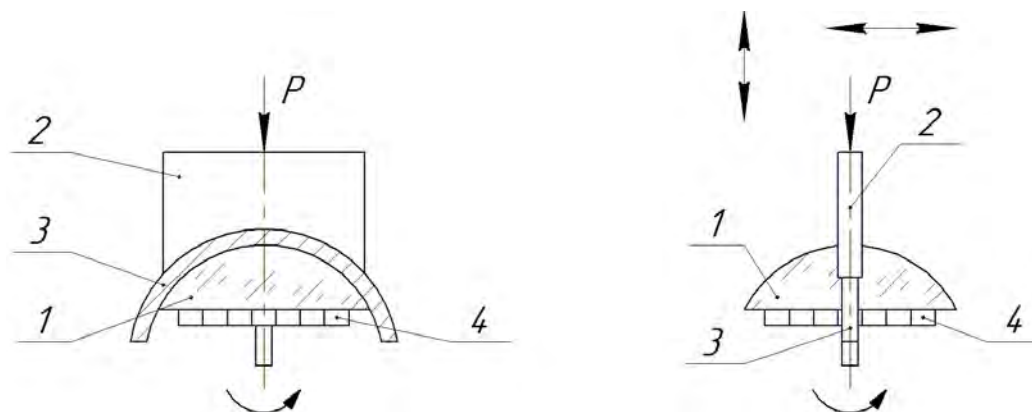


Рис. 11.5. Асферизация деталей ножевым инструментом

Шлифование выполняют свободным абразивом. Полирование производят на том же оборудовании ножевым инструментом, обтянутым, пропитанным смолой сукном.

11.3.5. Обработка методом квазисвободного притира

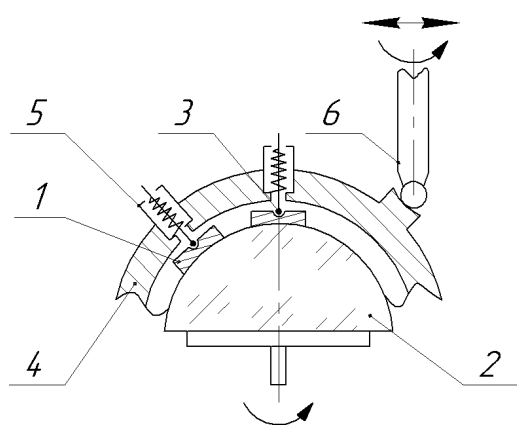


Рис. 11.6. Асферизация деталей методом квазисвободного притира

По данному методу можно обрабатывать (шлифовать и полировать) выпуклые и вогнутые асферические поверхности любого порядка. Применяется пружинно-каблучный инструмент, который соприкасается с заготовкой по площадкам конечных размеров. Его рабочая поверхность разбита на ряд площадок конечных размеров простой конфигурации, называемых каблучками 1, которые самоустанавливаются относительно поверхности заготовки 2 благодаря наличию сферического шарнира 3 (рис. 11.6).

Постоянное силовое замыкание каждого из каблучков с поверхностью обрабатываемой заготовки, которой служит сфера ближайшего радиуса, осуществляется пружинами 5. Корпус инструмента 4 вращается вокруг своей оси и имеет возвратно-поступательное перемещение относительно заготовки, передаваемое поводком 6. Расположение и количество каблучковых элементов рассчитывают, исходя из распределения слоя припуска по поверхности сферической заготовки. Приемы шлифования и полирова-

ния в данном случае такие же, как и при обработке сферических и плоских поверхностей.

11.4. Контроль асферических поверхностей

11.4.1. Контактные методы

Главное достоинство контактных методов заключается в том, что они применимы как для полированных, так и для шлифованных поверхностей, и их можно использовать непосредственно на рабочем месте. Однако эти методы имеют сравнительно невысокую точность. Они позволяют проверить поверхность в отдельных точках или зонах, т. е. относятся к дискретным методам, причем контакт измерительного инструмента с контактируемой поверхностью не исключает возможности повреждения последней.

Одним из контактных методов является измерение с помощью сферометров (рис. 11.7). В данном случае для ряда сечений с заранее выбранными координатами y_i измеряют стрелки прогиба z_i и сравнивают их с расчетными значениями. Для контроля одной поверхности необходимо иметь набор, состоящий, как правило, из 4–12 колец.

Для контроля асферических поверхностей, мало отличающихся от сферы или плоскости, используют сферические или плоские пробные стекла (рис. 11.8). Последние накладывают на контролируемую поверхность и наблюдают интерференционную картину.

Профиль асферической поверхности определяют по толщине воздушного промежутка, исходя из формулы

$$t = N\lambda / 2,$$

где N – число интерференционных колец, наблюдаемых на участке y_i ;

λ – длина волны источника света, используемого в процессе измерений.

Определение величин y и N проводят на измерительном микроскопе типа УИМ.

Необходимым условием правильного наложения РПС на контролируемую АП является расположение центра кривизны сферической поверхности на оси симметрии АП. Признаком выполнения этого условия является симметричность интерференционных колец, т. е. одинаковое их число слева и справа от вершины в любом меридиональном сечении.

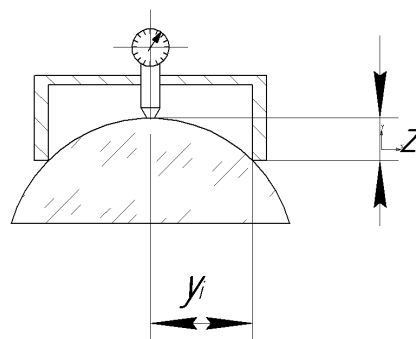


Рис. 11.7. Контроль асферической поверхности с помощью сферометра

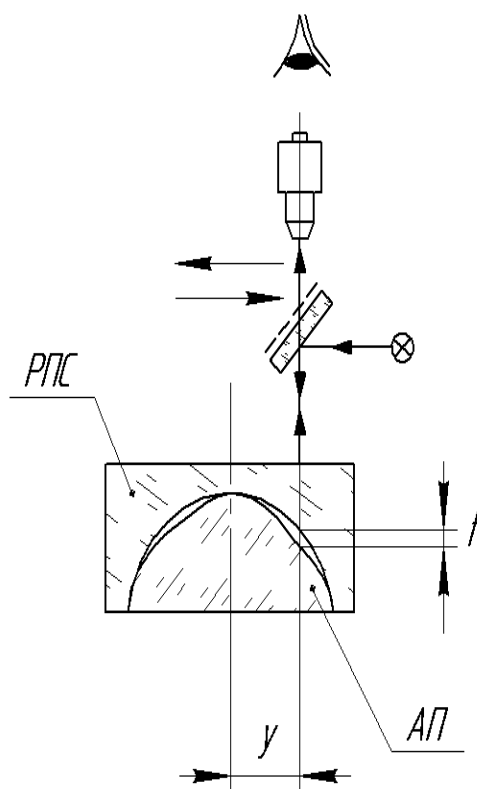


Рис. 11.8. Контроль асферической поверхности с помощью пробного стекла

Значительно реже применяют асферические пробные стекла. Это объясняется трудностью изготовления такого пробного стекла, сложностью его аттестации, а также более сложными приемами пользования асферическим пробным стеклом, т. е. необходимо точное совмещение осей эталонной и контролируемой поверхностей.

11.4.2. Бесконтактные методы

А. Метод анаберрационных точек

Поверхности, образованные вращением кривых второго порядка, имеют то свойство, что геометрические фокусы этих кривых являются анаберрационными точками. Это означает, что все лучи света, выходящие из одного геометрического фокуса, после отражения от поверхности собираются в одной точке, являющейся вторым геометрическим фокусом. Следовательно, геометрические фокусы являются оптически сопряженными, т. е. анаберрационными.

Для эллипсоида, образованного вращением эллипса вокруг его большой оси (рис. 11.9, а, б), анаберрационные точки F_1 и F_2 расположены по одну сторону от поверхности. Для гиперблоида, образованного вращением гиперболы вокруг оси, проходящей через ее вершину (рис. 11.9, в, г),

анаберрационные точки расположены по разные стороны от поверхности. Для параболоида (рис. 11.9, *д*, *е*) одна анаберрационная точка находится в оптическом фокусе, а другая – в бесконечности.

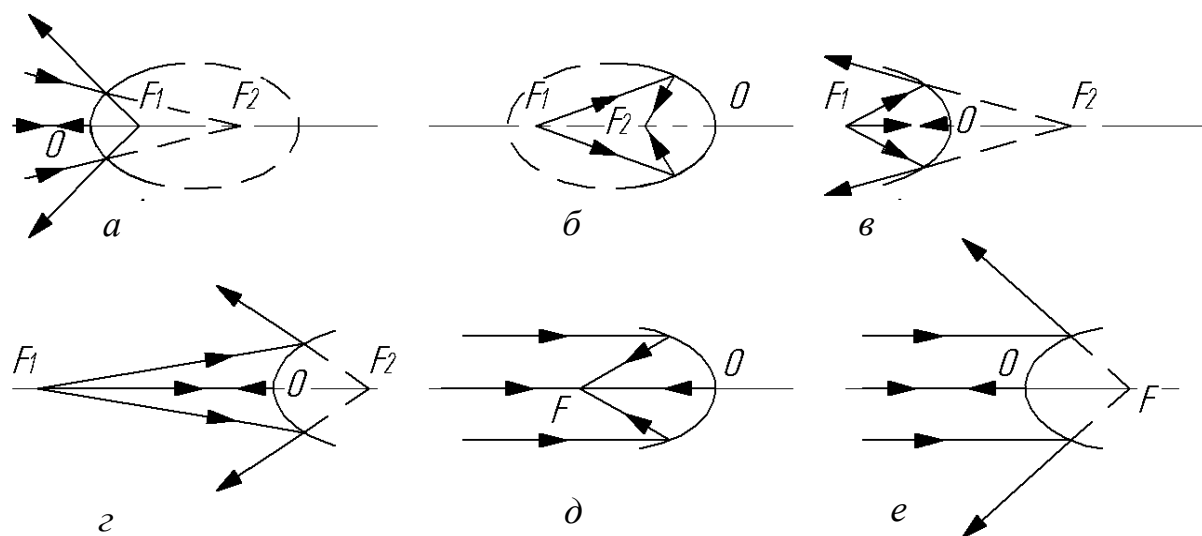


Рис. 11.9. Контроль асферической поверхности методом анаберрационных точек

Идея использования анаберрационных точек для контроля асферических поверхностей вращения второго порядка заключается в следующем. Если поверхность имеет идеальную форму и точечный источник света расположен в одном из геометрических фокусов, то отраженные от поверхности лучи образуют сферический волновой фронт, центр кривизны которого совпадает с другим геометрическим фокусом. Различные методы контроля, основанные на использовании анаберрационных точек, по существу, сводятся к исследованию тем или иным способом (интерференционным, теневым методом Фуко, голографическим и др.) сферического волнового фронта, образованного отраженными от поверхности лучами.

Если, например, требуется проконтролировать выпуклый параболоид, то удобно использовать автоколлимационную установку Б. А. Чунина, схема которой приведена на рис. 11.10. Здесь лучи света от осветителя *1* направляются в фокус параболоида *2* и при точной обработке его поверхности отражаются параллельным пучком. При прохождении этого пучка через зрительную трубу *3* в центре ее сетки будет наблюдаться изображение диафрагмы осветителя *1* (в виде точки или линии). Если поверхность параболоида неправильная, то лучи соберутся в некоторой точке *А*, расстояние Δ до которой можно определить непосредственно по сетке трубы *3*. Вращая осветитель *1* по стрелке *Б* относительно оси, проходящей через фокус *F* параболоида, можно проконтролировать всю поверхность в меридиональном сечении.

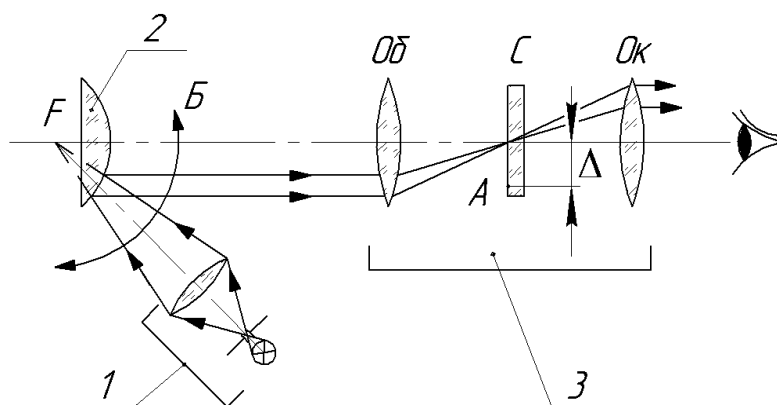


Рис. 11.10. Контроль асферической поверхности с помощью автоколлимационной установки Б. А. Чунина

Распространенным в производственных условиях является контроль АП по пятну рассеяния (рис. 11.11).

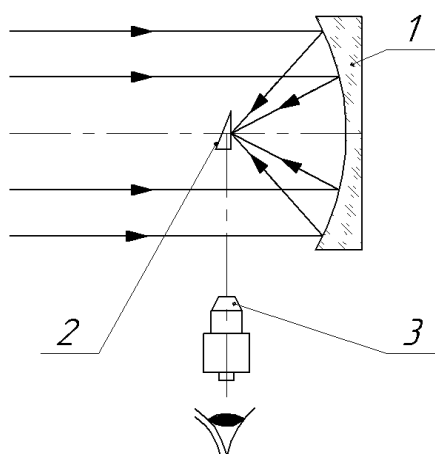


Рис. 11.11. Контроль асферической поверхности по пятну рассеяния

При контроле, например, параболоида *1* на его поверхность от коллиматора направляют параллельный пучок света, который фокусируется на призме *2* в виде пятна. Размер этого пятна измеряют с помощью микроскопа *3* и сравнивают с размером пятна от эталонного параболоида.

Б. Компенсационный метод

Трудности контроля АП, в общем случае обладающих большими аберрациями, стимулировали поиск различных путей решения этой задачи. Наиболее простой и естественный путь – применить известные методы оценки качества для контроля АП, т. е. создать такие условия, в которых контролируемая АП совместно с простейшими дополнительными элементами образовала бы оптическую систему, близкую к идеальной. Это и положено в основу компенсационного метода, в котором действие АП как источника больших аберраций, вызывающих сильное искажение волнового фронта, компенсируется дополнительными оптическими элементами.

Сущность метода заключается в том, что вся совокупность лучей, выходящих из дополнительной оптической системы (компенсатора), полностью совпадает с нормальными к контролируемой АП. Пусть на линзу 1 (рис. 11.12), выполняющую роль компенсатора, падает параллельный пучок лучей. Параметры компенсатора рассчитаны таким образом, что любой луч, выходящий из него, падает нормально к АП 2 и после отражения от нее повторяет свой путь в обратном направлении. С точки зрения теории аберраций это означает, что кривая сферической аберрации компенсатора полностью совпадает с кривой аберраций нормалей АП, при этом центр кривизны C_0 при вершине АП совмещен с парааксиальным фокусом F'_0 компенсатора, т. е. компенсатор преобразует падающий на него плоский или сферический волновой фронт в асферический, совпадающий с теоретической формой контролируемой АП. Волновой фронт, выходящий из компенсатора, служит своеобразным пробным стеклом, налагаемым на контролируемую АП.

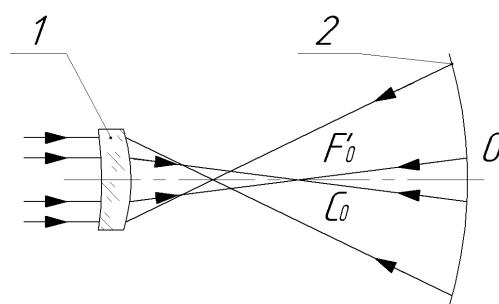


Рис. 11.12. Контроль асферической поверхности компенсационным методом

Одним из наиболее простых интерферометров, в котором для контроля АП используется компенсатор, является интерферометр Тваймана–Грина (рис. 11.13), в котором компенсатор 1 преобразует плоский волновой фронт, выходящий из интерферометра, в волновой фронт, совпадающий с расчетным профилем контролируемой АП 2, и, следовательно, все лучи направлены по нормали к последней.

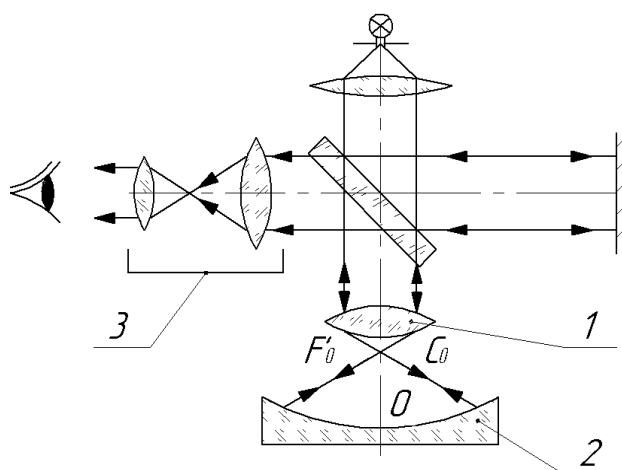


Рис. 11.13. Контроль асферической поверхности на интерферометре Тваймана–Грина

При прохождении лучей через зрительную трубу 3 будут наблюдаться интерференционные кольца или полосы, по которым легко определить погрешность изготовления АП.

Глава 12. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ШКАЛ И СЕТОК

12.1. Общие сведения о шкалах и сетках

По назначению сетки делятся на визирные (прицельные), измерительные (шкалы, лимбы, растры) и комбинированные. Визирные сетки (рис. 12.1, а) обычно имеют перекрестие (иногда с разрывом в центре) и предназначены для наведения на объект. Измерительные сетки (рис. 12.1, б) представляют собой системы повторяющихся однотипных элементов (линий или фигур), расположенных по определенному закону. Сетки с делениями, нанесенными в линейной мере, называются *шкалами*, а в угловой – *лимбами* (рис. 12.1, г). Комбинированные сетки представляют собой системы штрихов, марок, индексов и делений (рис. 12.1, в). Линии, индексы, фигуры и цифры, составляющие сетку, называют *элементами сетки*.

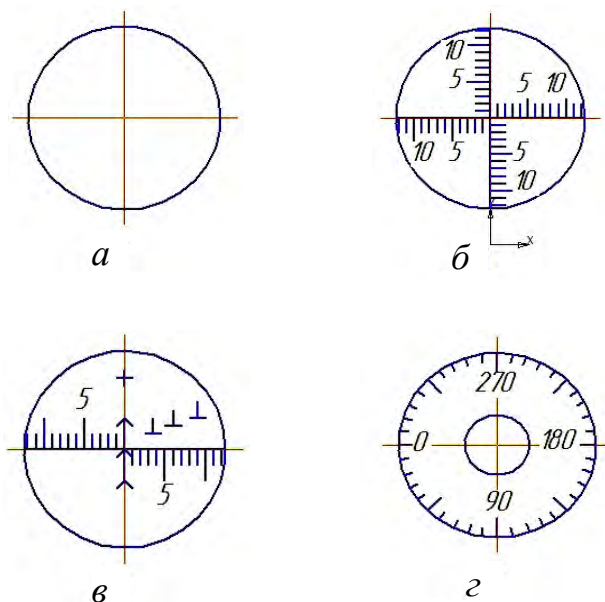


Рис. 12.1. Типы сеток

Поскольку сетку устанавливают, а следовательно, и рассматривают в плоскости изображения оптической системы, то все дефекты поверхности этой сетки (точки, царапины, выколки) и внутренние дефекты стекла, из которого она изготовлена (пузырьки, свили, шамот, камни), резко видны в поле зрения, что затрудняет наблюдение. Поэтому стекло для сеток не должно иметь каких-либо внутренних дефектов, а чистота поверхности детали должна выдерживаться в пределах 1–10, 1–20, 1–40, I, II классов. Такую чистоту деталей сравнительно легко получить полированием волокнистыми полировальниками и сложнее – смоляными.

Большое значение имеет химический состав стекла. Марку стекла выбирают в зависимости от способа нанесения сетки. Если сетка изготавливается травлением в парах плавиковой кислоты, то лучше всего брать

стекла марок БК5, БК6, БК10, которые обладают достаточной химической стойкостью и хорошо поддаются травлению (образуется матовый штрих). При изготовлении сеток резанием и фотографическим способом рекомендуется брать стекло марки К8, которое отличается высокой твердостью, химической устойчивостью и хорошо полируется.

Нанесенные на сетку штрихи должны иметь ровные и четкие края при наблюдении под увеличением, равным увеличению прибора, в котором будет установлена сетка. Для окрашенных сеток обязательно постоянство цвета всех штрихов.

12.2. Механические методы изготовления шкал

12.2.1. Резание стекла

Нарезанные штрихи сетки непосредственно на стекле можно получить только при помощи алмаза. Резанием стеклянной подложки изготавливают дифракционные решетки, работающие в проходящем свете.

Алмазные резцы определенной формы изготавливают путем их заточки. Головка алмазного резца для нанесения весьма тонких штрихов (порядка 3 мкм) обычно имеет вид трехгранной пирамиды, вершина которой углубляется в стекло, образуя штрих требуемой ширины.

Для заточки алмаз впаивают медью или серебряным припоем в оправу из низкоуглеродистой стали, затачивают на специальных станках с дисками из перлитного чугуна, в тщательно отшлифованную поверхность которых втирают алмазную пыль. Затачивают резцы также и на агате.

Качество наносимых штрихов во многом зависит от правильного выбора положения режущей кромки и наклона передней грани резца к плоскости заготовки. Для обеспечения постоянства глубины и ширины штрихов резец должен перемещаться с постоянной скоростью. При оптимальной скорости края штрихов получаются четкими и сами штрихи не будут пунктирными.

Подбором той или иной нагрузки на резец и скорости резания можно получить матовый или глянцевый штрихи (для дифракционных решеток необходим последний). При малой нагрузке на режущий инструмент характер разрушения стекла подобен резанию пластического материала, т. е. образуются глянцевые штрихи. Тонкие матовые штрихи необходимы в тех случаях, когда впоследствии их будут запускать черным запуском (например, сетки для окулярных микрометров).

12.2.2. Изготовление светлополюсных сеток

Гравирование заключается в нанесении элементов сетки на слое воска, покрывающем стекло, при помощи резца. Гравируемый материал (воск) передней гранью резца выдавливают в виде сливной стружки или отдель-

ных кусков по всей ширине грани резца. В результате образуется бороздка, по сторонам которой воск должен быть нетронутым.

Для получения гравированных элементов постоянной ширины и глубины, с ровными и четкими краями, без заусенцев, трещин и разрыхлений защитный грунт должен:

- хорошо поддаваться воздействию резца и удаляться им с поверхности заготовки;

- иметь постоянную толщину слоя с минимальной зернистостью;

- хорошо приставать к поверхности подложки, не морщиться и не отставать при гравировании;

- не прилипать к граням резца и не оплывать с краев штриха в течение определенного времени;

- не крошиться в местах пересечения штрихов;

- не иметь загрязнений и пузырей;

- надежно закрывать поверхность подложки, прочно удерживаться на ней при травлении и промывке водой и не давать на поверхности загрязнений или налетов, ухудшающих качество сетки;

- легко наноситься на поверхность детали и легко удаляться с нее промывкой в растворителе без механического воздействия.

Всем этим требованиям хорошо удовлетворяет чистый вареный пчелиный воск.

Перед нанесением воска деталь тщательно очищают и нагревают до 80–100 °С. Воск наносят беличьей кистью, предварительно расплавив его. Толщину слоя воска следует понижать с уменьшением ширины штрихов. При ширине штрихов 5 мкм толщина слоя покрытия должна быть порядка 3 мкм. Покрытую воском деталь охлаждают равномерно и быстро, что позволяет получить мелкозернистую структуру грунта, требуемую для образования ровного штриха. Для быстрого охлаждения деталь после нанесения на нее воска помещают на массивную металлическую плиту. После этого деталь поступает на деление, которое производится на ручных или автоматических машинах стальным резцом. При гравировании по защитному слою на нем могут появиться различные дефекты-царапины, точки, пузырьки воздуха, волоски, пылинки и пр. Эти дефекты выявляют и ретушируют (закрывают) сырым воском с помощью разогретой металлической шпильки в процессе контроля детали после гравирования.

После гравирования детали направляют на операцию травления, которую производят пластиковой (фтористоводородной) кислотой. Процесс травления стекла должен обеспечить:

- определенную ширину и глубину штриха, резкость его краев без неровностей и бахромок;

- образование глянцевого или матового поверхности штриха;

- отсутствие налетов на поверхности стекла под защитным грунтом;

- отсутствие отслаивания воска от подложки и его разрушения.

Матовые штрихи получают травлением стекла в парах плавиковой кислоты (так травят штрихи в среднем от 2 до 15 мкм), а глянцевые – травлением жидкой кислотой методом окунания или тампоном (так травят широкие штрихи).

При травлении сетки парами кислоты оправку 1 с сеткой 2 (рис. 12.2) помещают над сосудом 3 с кислотой (защитный слой воска 4 должен быть обращен внутрь сосуда). Для более равномерного травления оправку 1 с деталью вращают (вручную) вокруг их оси в крышке 5. Детали 1, 3, 5 обычно изготавливают из винипласта.

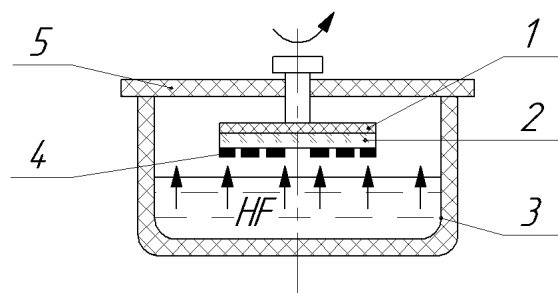


Рис. 12.2. Травление сеток

Перед травлением незащищенные воском места детали обмазывают (покрывают) вареным вазелином. Продолжительность травления невелика и зависит в основном от ширины штриха, концентрации кислоты и температуры воздуха. При оптимальных концентрациях кислоты и температуре воздуха (для стекла БК10 – порядка 1 °С) время травления составляет 3–10 с (режим травления подбирают на бракованных деталях).

Для травления сеток можно применять как концентрированный раствор плавиковой кислоты (60–70 %), так и смесь раствора HF более низкой концентрации и серную кислоту H₂SO₄ высокой концентрации. Например, для травления стекла БК10 можно брать смесь 40%-й HF и концентрированной H₂SO₄ (удельный вес 1,84) в количестве 25 % (при травлении стекла К8 ухудшается матовость штрихов). Главная роль H₂SO₄ сводится к увеличению общей кислотности травящей ванны (повышению концентрации H-ионов) и регенерации кислоты HF, которая выделяется при реакции соли кремнефтористоводородной кислоты с серной кислотой:



По окончании травления деталь промывают проточной водой или раствором щелочи, нейтрализующим кислоту. Защитный слой удаляют растворением его в бензине или в растворе едкой щелочи. Затем деталь промывают в проточной воде, ополаскивают дистиллированной водой, сушат, для удаления соли в канавках штрихов протирают эфиром и трехпроцентной азотной кислотой и полученный рисунок проверяют под микроскопом.

Чтобы в поле зрения прибора протравленный штрих на сетке был более четким, его следует наполнить (запустить) цветным запуском. Применяют следующие запуски: черный (графит, окись меди, двуокись марганца, газовая сажа), белый (окись цинка, двуокись титана, свинцовые белила, эмаль), красный (свинцовый сурик, ртутная киноварь), желтый (охра), зеленый (окись хрома). Эти порошки смешивают с соответствующими свя-

зывающими веществами. Штрихи на деталях заполняют вручную шелковой или хлопчатобумажной салфеткой, намотанной на палец. Для удаления нанесенного состава с промежутков между штрихами деталь протирают сухим запуском.

Для упрочнения красящего состава деталь просушивают в термостате при температуре 120–140 °С в течение 4 ч. Просушенные сетки медленно охлаждают до комнатной температуры. После просушки качество заполнения штрихов проверяют запуском. Если штрихи не полностью запустились, то их запускают еще раз и деталь снова просушивают в термостате. При необходимости провести оцифровку такой сетки ее повторно покрывают воском, гравировать требуемые элементы и все операции выполняют, как и при получении штрихов.

Недостатками гравирования по воску являются трудоемкость процесса, трудность получения штрихов шириной 3–5 мкм и вредность плавиковой кислоты.

Приведенный вариант позволяет получать сетки с непрозрачным рисунком на прозрачном фоне. Другой вариант получения таких же сеток (светлополюсных) заключается в гравировании по тонкому слою специального лака. После нанесения заданного рисунка деталь устанавливают под колпак вакуумной установки и хром распыляют. При смывании слоя лака вместе с ним удаляется осевший на его поверхности металл, в то время как хром, попавший на открытые участки стекла (в штрихи), остается, образуя рисунок детали.

В обоих вариантах при изготовлении сеток резец не должен оставлять какие-либо следы на поверхности стекла подложки.

12.2.3. Изготовление темнополюсных сеток

Темнополюсными называют сетки с прозрачными штрихами на непрозрачном фоне. Такие сетки можно получить гравированием непосредственно по металлическому слою (Cr, Al, Ag), нанесенному на стеклянные заготовки, или же по слою воска (лака) на металлизированных стеклянных подложках с последующим травлением металла.

При гравировании по металлическому слою используют алмазный или металлический резцы. Гравирование необходимо проводить сразу же после нанесения металла, когда он имеет мелкозернистую структуру, которая со временем, особенно при нагревании, переходит в крупнозернистую. Нанесение штрихов на старых пленках приводит к растрескиванию их краев, которые становятся рваными, и пленка легко отслаивается от подложки. Наиболее тонкие штрихи получаются при гравировании по полупрозрачному слою серебра, нанесенному на заготовку химическим путем.

Прозрачные штрихи на темном фоне можно получить нанесением на металлическое покрытие грунта, по которому на делительных машинах

гравировать штрихи металлическим резцом, а затем осуществляют травление металла до образования прозрачных штрихов. После этого грунт смывают с заготовки.

Для травления металлических покрытий используют:

для хрома – соляную кислоту;

алюминия – 5%-й раствор едкой щелочи, крепкую H_2SO_4 с добавлением 15 % марганцевокислого калия (при травлении последним травителем отслаивание грунта происходит реже, чем при травлении щелочью), концентрированную HNO_3 , хлорное железо;

серебра – концентрированную HNO_3 или H_2SO_4 с марганцевокислым калием.

Последней операцией изготовления темнопольных сеток является их контроль под микроскопом и придание полной непрозрачности металлическому слою в местах отсутствия штрихов и знаков (при нанесении металла он не всегда плотно покрывает всю подложку: возможны отдельные непокрытые точки), что достигается нанесением тонкого слоя черного лака. Этот лак выполняет также защитную функцию при возможных повреждениях сетки.

12.2.4. Резцы для гравирования по грунту

Для гравирования по грунту используют металлические резцы. Их изготавливают из инструментальной углеродистой (У8А, У10А, У12) или из легированных сталей (ХВГ, 9ХС, ХВ5). Применяют также кованые резцы из стали Р18. Эту сталь подвергают многократной ковке с 35–37%-м уменьшением по диаметру.

Для обеспечения нужной ширины штриха резец должен иметь притупление. Следует всегда выбирать форму резца, имеющую большую площадь притупления при одинаковой ее ширине. Это способствует большей износоустойчивости резца. Однако при повышении площади притупления несколько ухудшается чистота штриха в его начале, так как грунт при опускании резца удаляется выдавливанием, а не резанием его передней гранью. Если гравированные штрихи имеют одно направление, то применяют резец трапецеидального сечения (рис. 12.3, а). Резцы такого же сечения используют в том случае, если штрихи располагаются взаимно перпендикулярно, а делительная машина позволяет поворачивать деталь или резец в требуемом направлении. Если на машине нет поворотного устройства, резец должен иметь квадратное сечение (рис. 12.3, б), а при различной ширине – прямоугольное. Для гравирования цифр и букв применяют резец, заточенный на конус (рис. 12.3, в).

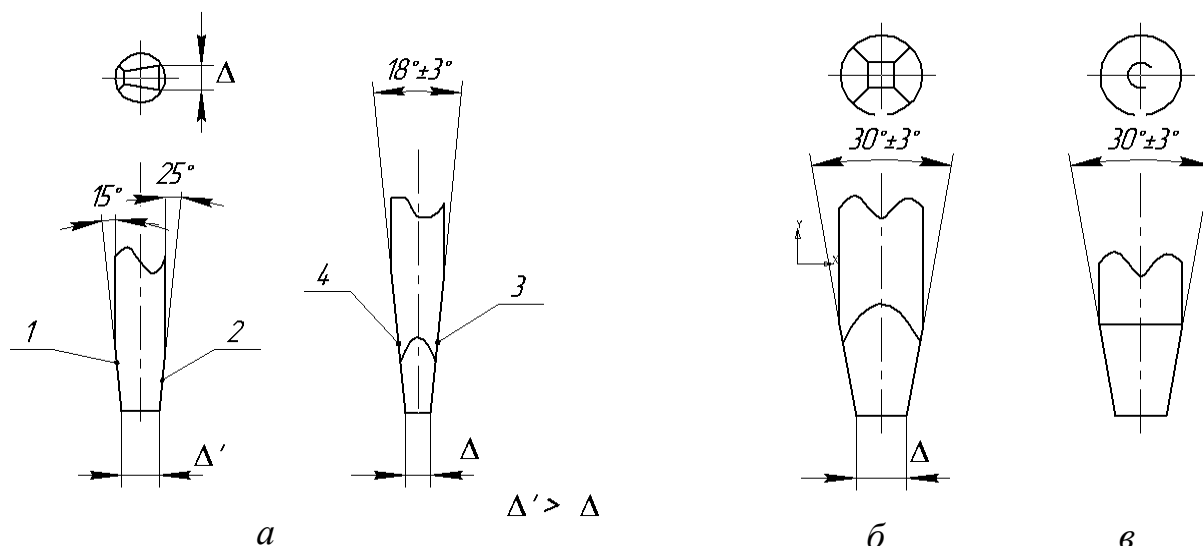


Рис. 12.3. Металлические резцы для гравирования по грунту:
 1 – передняя грань; 2 – задняя грань; 3, 4 – боковые грани

Резцы затачивают на заточных камнях. После заточки производится закалка и отпуск резца, а затем окончательная доводка его граней на неподвижной плите 1 с использованием призмы 2 (рис. 12.4, а).

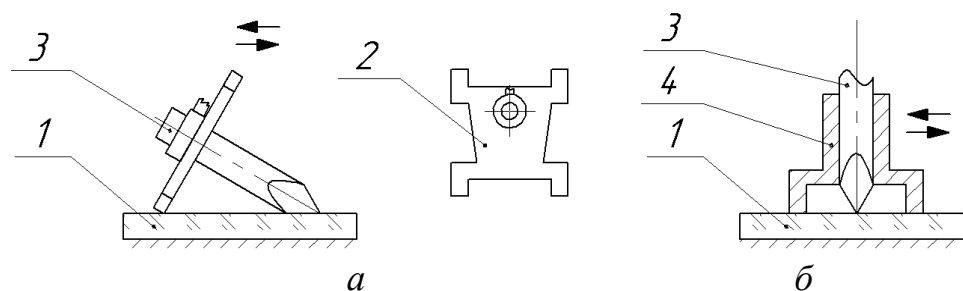


Рис. 12.4. Приспособления для заточки резцов

Резец притупляют до требуемой величины Δ на этой же неподвижной плите 1 с использованием специальной оправки 4 (рис. 12.4, б), ось которой строго перпендикулярна основанию. Резец 3 должен свободно перемещаться вдоль оси оправки 4 без люфтов и заеданий. Однако резец будет гравировать более качественно, если его притупить непосредственно на делительное оборудование.

12.2.5. Оборудование для нанесения элементов сеток

Оборудование для изготовления сеток делят на две основные группы – делительные и копировальные машины.

Делительные машины наносят элементы сеток путем перемещения резца или заготовки в определенных направлениях и на заданные расстояния при помощи специальных рабочих органов. В зависимости от метода

измерения величины перемещения рабочего органа делительные машины подразделяются на механические, оптические, фотоэлектрические и электромеханические.

В механических машинах для перемещения рабочего органа с заготовкой служит микрометрическая пара (винт-гайка). Поэтому точность перемещения рабочего органа определяется точностью изготовления микрометрической пары. Эти пары изготавливают по специальной технологии, которая обеспечивает минимальные периодические ошибки, хотя и не устраняет накопленные. Накопленные ошибки в этих машинах компенсируются специальной коррекционной линейкой, которая закрепляется на станине. По этой линейке скользит рычаг, жестко закрепленный на винте. При перемещении рабочего органа конец рычага скользит по профилю коррекционной линейки, поворачивая при этом винт и перемещая рабочий стол с сеткой на величину погрешности микрометрической пары.

Недостатком механических машин является потеря точности микрометрической пары в результате ее износа, а также несоблюдение принципа компенсации (не совпадают плоскости нанесения штрихов и действия сил, перемещающих заготовку).

Для определения величин перемещения рабочего органа в оптических делительных машинах применяют шкалы и отсчетные микроскопы, в фотоэлектрических – фотометрические системы контроля и управления и системы с фотоэлектрическими микроскопами, а также системы с интерференционными и растровыми датчиками, в электромеханических – шаговые двигатели. Используются также ручные делительные машины.

В зависимости от направления расположения делений при изготовлении сеток делительные машины подразделяют на продольные, круговые и специальные. Последние применяются для нанесения кривых сложной конфигурации и изготовления сеток с неравномерной шкалой деления.

На делительных машинах, имеющих поворотный стол, необходимо центрировать резец относительно оси вращения стола. Эта операция выполняется следующим образом. На покрытой воском заготовке, установленной примерно в центре стола, наносят штрих *A* (рис. 12.5). Затем, повернув стол на 180° , наносят второй штрих *B*. Измерив микроскопом расстояние l между штрихами *A* и *B*, устраняют смещение резца от центра перемещением стола на величину $l/2$ в соответствующую сторону и опять прочерчивают две линии. Операцию повторяют до совпадения линий (линия *C* на рис. 12.5).

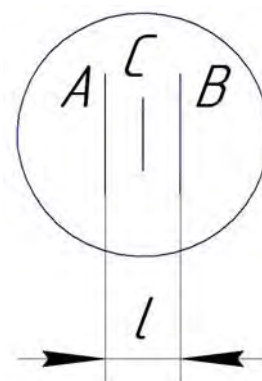


Рис. 12.5. Схема центрирования резца на делительном оборудовании

Копировальные машины (пантографы) предназначены для нанесения шкал и сеток на стеклянные заготовки с эталона при помощи шарнирно-рычажной системы. Увеличенный эталон сетки является шаблоном-копи-

ром, по рельефным элементам которого движется обводной шпиль (водитель), передающий движение резцу через шарнирно-рычажную систему. Копир и заготовка в процессе нанесения сетки обычно неподвижны. Масштаб сетки (по отношению к копиру) определяется соотношением плеч пантографа и находится в пределах 1 : 10...1 : 100.

Различают горизонтальные и вертикальные пантографы. Пантографы бывают однорезцовыми и многорезцовыми. Горизонтальный пантограф представляет собой шарнирный параллелограмм (рис. 11.6, *a*), у которого одно из звеньев шарниром П (полюсом) связано со станиной, а на двух других звеньях или на их продолжениях находятся сопряженные друг с другом точки В (водитель) и Р (резец). Вертикальный пантограф (рис. 12.6, *б*) состоит из прямолинейной штанги, подвешенной к станине на шаровом шарнире. Сверху и снизу в штангу 3 входят два поршня. В нижнем поршне закреплен водитель, а в верхнем – резец.

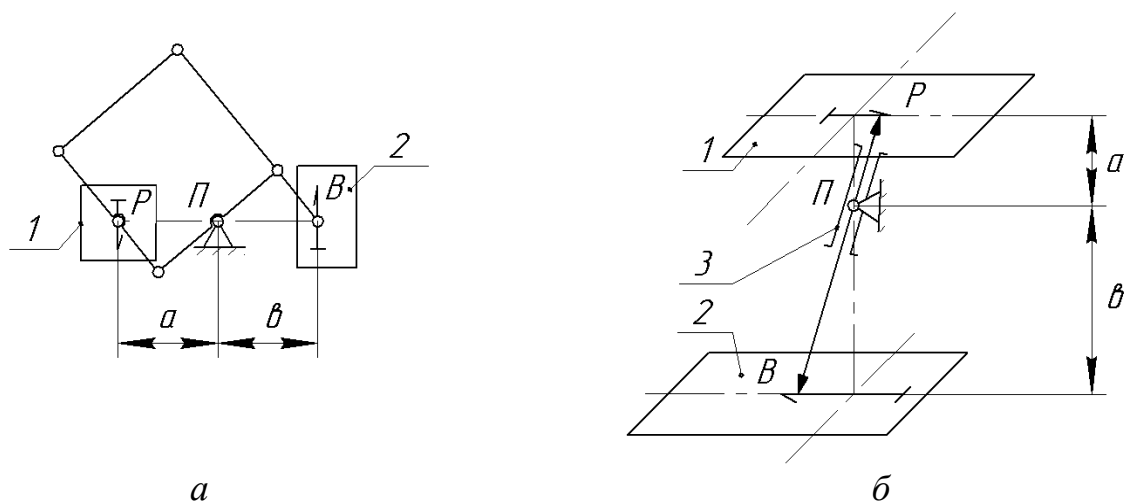


Рис. 12.6. Пантографы для нанесения шкал и сеток

Для сохранения строгого подобия элементов сетки 1 элементам копира 2 необходимо, чтобы в горизонтальном пантографе резец, водитель и ось шарнира П всегда находились в одной плоскости, были параллельны между собой и перпендикулярны плоскостям сетки и копира. В вертикальном пантографе оси резца и водителя должны лежать на одной прямой, проходящей через центр шарнира П. Масштаб уменьшения элементов сетки относительно элементов копира равен отношению

$$m = a / b.$$

Изменение масштаба в горизонтальном пантографе достигается перемещением точек П и Р вдоль соответствующих звеньев пантографа, а в вертикальном – перемещением поршней водителя и резца вдоль оси штанги.

Копиры для пантографов представляют собой металлические пластины со всеми элементами изготавливаемых сеток в виде углубленных канавок,

по которым движется водитель пантографа. Копиры обычно изготавливают из бронзы или латуни специальных сортов. При массовом производстве выгоднее применять шаблоны из закаленной стали. При оцифровке сеток, изготовленных на делительных машинах, используют наборные копиры.

12.3. Фотолитографический метод изготовления сеток

12.3.1. Физико-химические основы процесса. Фоторезисты и их свойства

В основе фотолитографического процесса лежит фотохимическое действие света на вещество (фоторезист), в результате которого происходит изменение некоторых его свойств, в частности, скорости растворения в определенных растворителях.

Фоторезисты (ФР) представляют собой сложные полимерно-мономерные системы, обладающие светочувствительными и защитными (резистивными) свойствами (выдерживают нагрев, действие кислот и щелочей).

Световая энергия, падая на ФР, поглощается его молекулами (или атомами), увеличивая при этом запас их внутренней энергии. В результате этого взаимодействия молекулы ФР переходят из основного (нормального) состояния в электронно-возбужденное, а по истечении некоторого времени они теряют избыточную энергию и возвращаются в нормальное состояние. Этот переход может сопровождаться химическими превращениями ФР.

В зависимости от механизма протекающих в ФР реакций при их облучении светом и особенностей изменения их свойств ФР делятся на негативные и позитивные. При облучении негативного ФР в нем протекают процессы, приводящие к потере его растворимости. В результате этого после обработки в растворителях (проявителях) удаляются только необлученные участки ФР, расположенные под непрозрачными элементами фотошаблона. На подложке образуется защитный рельеф, повторяющий негативное изображение фотошаблона.

В позитивных ФР под действием света происходят фотохимические реакции, приводящие к усилению растворимости ФР в проявителях. В результате этого удаляются только облученные участки фоторезиста и полученный защитный рельеф повторяет изображение фотошаблона.

Основными характеристиками фоторезистов являются светочувствительность, разрешающая способность и устойчивость к химическим воздействиям.

Светочувствительность S – величина, обратная экспозиции H , требуемая для перевода ФР в растворимое или нерастворимое состояние:

$$S = 1 / H = 1 / Et,$$

где E – освещенность;
 t – время выдержки.

Разрешающая способность R – максимально возможное число раздельно передаваемых линий фоторезистом на 1 мм поверхности подложки:

$$R = 1000 / 2l,$$

где l – ширина раздельно передаваемой линии, мкм.

Следует различать разрешающую способность ФР и процесса фотолитографии в целом. Так, при разрешающей способности ФР около 1000 лин./мм процесс фотолитографии позволяет получать разрешающую способность около 600 лин./мм, что объясняется наличием дифракции, рассеяния и отражения света в системе «подложка–ФР–фотошаблон».

Позитивные ФР по сравнению с негативными имеют более высокую разрешающую способность.

ФР должны обладать высокой химической устойчивостью, так как на операциях травления их защитный рельеф значительное время контактирует с концентрированными кислотами и щелочами. Кислотостойкость ФР оценивают фактором травления

$$K = h / \chi,$$

где h – глубина травления;

χ – боковое подтравливание.

12.3.2. Основные операции фотолитографического процесса

При изготовлении сеток методом фотолитографии применяют следующий типовой технологический процесс: нанесение слоя металла, нанесение ФР, сушка ФР, экспонирование, проявление ФР, задубливание ФР, травление металла.

Нанесение слоя металла (Cr, Al) на полированную стеклянную подложку выполняют на вакуумных установках.

Основными технологическими методами нанесения ФР на поверхность подложек являются центрифугирование, распыление (пульверизация) и окунание.

Наиболее широко применяется первый метод. Его сущность заключается в нанесении на подложку определенной дозы ФР и получении необходимой толщины пленки за счет вращения центрифуги с заданной скоростью. Время центрифугирования мало влияет на параметры слоя. Для формирования слоя обычно достаточно 20–30 с.

Сушка является операцией, завершающей формирование слоя ФР.

Назначение сушки – повышение прочности пленки ФР и увеличение ее адгезии к поверхности подложки. Эти процессы связаны с испарением растворителя из ФР, в результате чего происходят сложные процессы, уплотняющие молекулярную структуру пленки ФР, уменьшающие внут-

ренные напряжения и повышающие адгезию пленки к подложке. Неполное удаление растворителя снижает кислотостойкость ФР, что приводит к повышению брака на операции проявления.

Распространены следующие виды сушки ФР: конвективная, радиационная и СВЧ-сушка. Конвективная сушка производится в термошкафах при температуре 90–100 °С в течение 10–60 мин (в зависимости от состава и толщины пленки ФР). При радиационной сушке используется лучистый нагрев изделий ИК-излучением. При СВЧ-сушке пластины нагреваются за счет поглощения электромагнитной энергии СВЧ-поля. При любом способе сушки допустимая температура нагрева не должна превышать 120 °С. Высушенный ФР необходимо экспонировать не позднее чем через 10 ч.

А. Экспонирование

Экспонирование ФР производят через фотошаблон (ФШ), который представляет собой копию изготавливаемой сетки. Для передачи изображения ФШ на заготовку применяют контактный и проекционный способы. Схема экспонирования контактным способом представлена на рис. 12.7, а. При экспонировании ФШ 3 прижимают к слою ФР 4, который нанесен на заготовку 5, установленную на столе 6, и световое излучение от УФ-источника 1 проходит конденсор 2 и параллельным пучком засвечивает слой ФР через прозрачные окна на ФШ. При контактной фотолитографии тесный контакт между ФШ 3 и заготовкой 5 при экспонировании происходит лишь в нескольких точках из-за неплоскостности контактирующих поверхностей (фотошаблон и подложки сеток полируют на волокнистых полировальниках). Из-за дифракционных явлений наличие зазора оказывает существенное влияние на качество переноса изображения ФШ на подложку сетки. В результате дифракции света на непрозрачных участках ФШ, например на краю прозрачного окна размером a (рис. 12.7, б), световой пучок после фотошаблона расширяется и заходит в область геометрической тени. Ширина освещенной зоны b в области геометрической тени определяется из выражения $b = d\lambda / a$, которое показывает, что размытие увеличивается с увеличением зазора d и длины волны используемого излучения λ , а также с уменьшением ширины щели a . Причем если в плоскости ФШ распределение интенсивности света равномерно вдоль окна и равно J_0 , то в плоскости ФР оно неравномерно. Изображение щели формируется центральным максимумом, в котором содержится около 84 % световой энергии, поступающей через щель.

Кроме дифракции на качество переноса изображения ФШ на заготовку влияет вторичное отражение. Большая часть УФ-излучения проходит через ФР и отражается от пленки металла на заготовке (рис. 12.7, в). Отраженное излучение направлено к ФШ под углом, достаточным для его вторичного отражения от шаблона снова в резистивную пленку. Это явление

особенно вредно при использовании тонких резистивных пленок для получения рисунков с высокой разрешающей способностью. Чтобы предотвратить паразитное отражение излучения, на металлической пленке создают специальное противоореольное покрытие или неотражающую матовую поверхность.

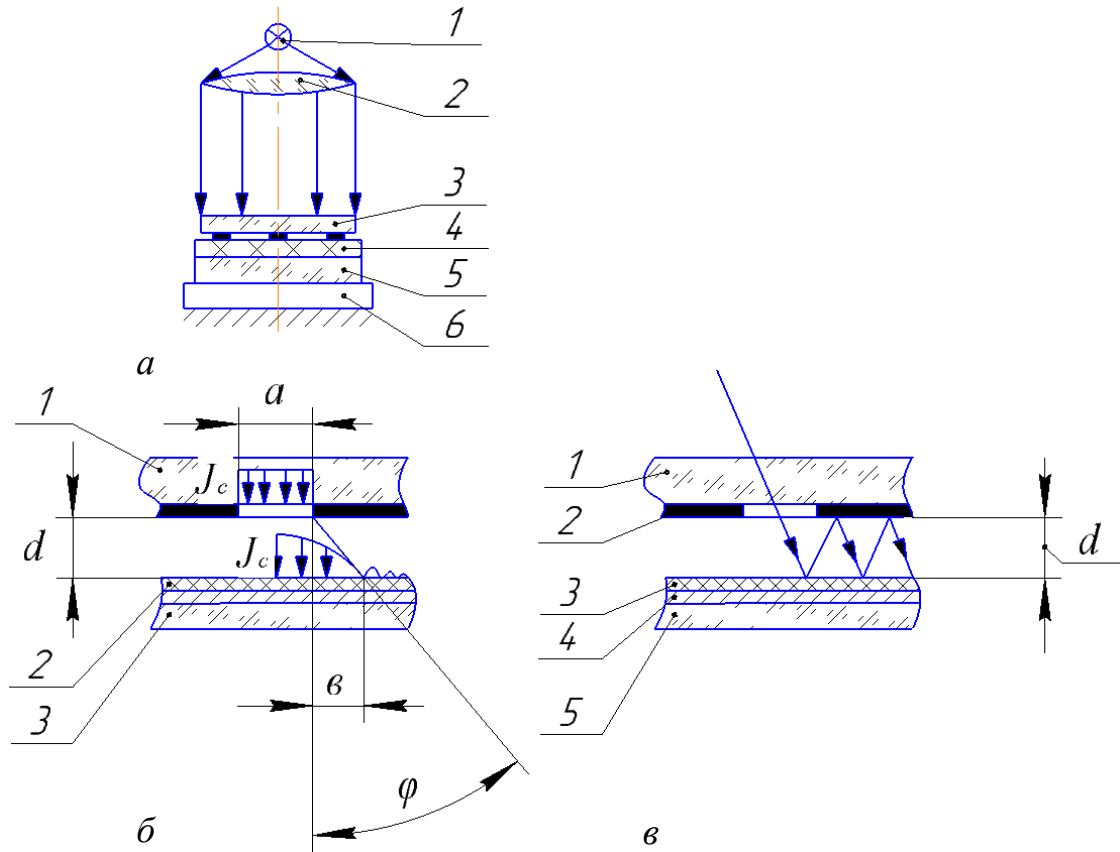


Рис. 12.7. Схема экспонирования контактным способом

Как дифракция, так и паразитное отражение приводят к тому, что после проявления элементы сетки имеют нерезкий контур – вуаль. Область вуали характеризуется не полностью сшитым (или разрушенным) ФР и зависит от экспозиции. Оптимальная экспозиция позволяет получить минимальный размер вуали. Контактная фотолитография, кроме того, не позволяет получить элементы размерами менее 2 мкм.

При проекционном экспонировании подложка и ФШ не контактируют друг с другом, что повышает стойкость фотошаблона и способствует улучшению качества изображения. По способу формирования изображения на подложке проекционным экспонированием различают системы с одновременным переносом изображения ФШ на все рабочее поле подложки в масштабе 1:1 и системы с последовательным пошаговым мультиплицированным переносом изображения в уменьшенном масштабе. В последнем случае используют промежуточный ФШ, представляющий собой одиночное изображение рисунка сетки, выполненное в увеличенном масштабе (10:1).

Принципиальная схема проекционного экспонирования представлена на рис. 12.8. Изображение ФШ 3 проецируется объективом 4 на подложку 6, покрытую слоем ФР 5 и расположенную на координатном столе 7. Экспонирование осуществляется излучением источника 1 через конденсор 2. Получение сеток методом мультипликации достигается многократным экспонированием с перемещением стола 7 на требуемый шаг в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

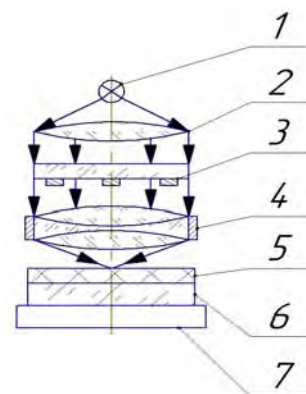


Рис. 12.8. Схема проекционного экспонирования

С помощью проекционной печати получают элемент размером 1–1,5 мкм. При этом к толщине слоя экспонирования предъявляются более жесткие требования. В проекционных системах используют совершенную оптику, разрешающая способность которой ограничена только явлениями дифракции, а не различными аберрациями.

Б. Проявление

Процесс проявления ФР заключается в удалении после экспонирования ненужных участков ФР с поверхности подложки. При проявлении негативных ФР происходит растворение неэкспонированных участков фотослоя, а при проявлении позитивных – растворение экспонированных участков.

Проявление негативных ФР производят в органических растворителях (трихлорэтилене, толуоле, хлорбензоле, ксилоле), а позитивных – в неорганических соединениях со щелочными свойствами (слабых водных и водно-глицериновых растворах КОН, NaOH).

Экспонирование и проявление неразрывно связаны между собой. Для выбора режимов одновременно изменяют время проявления и экспонирования либо подбирают оптимальное значение одного параметра при фиксации другого. При постоянных условиях проявления с ростом экспозиции увеличиваются размеры элементов для позитивного ФР и уменьшаются – для негативного. При этом для негативного ФР режимы проявления слабо влияют на точность передачи изображения, и перепроявление для них件опасно. Для позитивных ФР проявление сопряжено с частичным растворением, т. е. с уменьшением толщины и подтравливанием по контуру незаэкспонированных участков.

С целью регулирования скоростей растворения облученных и необлученных участков ФР в проявитель добавляют вещества, замедляющие процесс проявления. Такой проявитель называют б у ф е р н ы м. Важной характеристикой проявителей является величина pH раствора. Точную передачу размеров изображения удается получить при использовании проявителей с pH = 12,3–12,4 при температуре 25 °С.

Подбирая режимы экспонирования, проявления и состав проявителей, можно добиться того, что боковые стенки рельефа рисунка ФР будут иметь различный наклон (рис. 12.9).

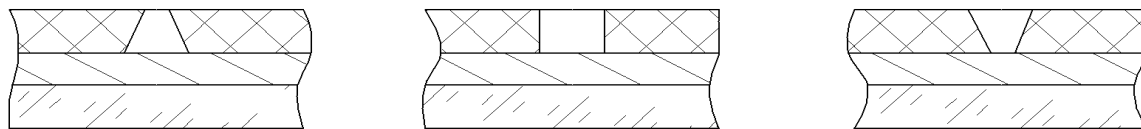


Рис. 12.9. Возможные наклоны боковых стенок рельефа при получении сеток методом фотолитографии

В. Задубливание

Целью процесса задубливания ФР после проявления является испарение остатков проявителей, размягчающих слои, и дополнительная пространственная полимеризация пленки, увеличивающая ее кислотостойкость, а также адгезию пленки к подложке.

От температуры и характера ее повышения во время сушки зависит точность передачи размеров. Резкий нагрев вызывает оплавление краев ФР, поэтому для точной передачи малых (1–2 мкм) размеров следует применять плавное или ступенчатое повышение температуры. Максимальная температура задубливания 200–220 °С при выдержке до 1 ч.

12.3.3. Элионные методы литографии

Разрешающая способность современной фотолитографии достигла теоретического предела и составляет 0,8–1 мкм. Для получения субмикронных размеров линий необходимо переходить к другим методам облучения, используя другие длины волн излучения, например, облучение электронами, рентгеновскими квантами и ионами. Эти методы называются элионной литографией.

А. Рентгенолитография

Использование рентгеновского излучения с $\lambda = 0,4\text{--}5$ нм повышает разрешающую способность литографии до 0,1 мкм. Кроме того, рентгеновские лучи нечувствительны к различным загрязнениям на шаблоне (пылинкам, остаткам резиста, следам влаги и пр.).

При поглощении квантов рентгеновского излучения молекулами в них происходит генерация фотоэлектронов, обладающих энергией $(1,6\text{--}4,8) \times 10^{-16}$ Дж и способных изменять химическую структуру. Движение электронов (рассеяние) продолжается до тех пор, пока их энергия не упадет до уровня около $8 \cdot 10^{-18}$ Дж. Путь, проходимый электронами, определяет их разрешающую способность.

Б. Электронолитография

Движущийся электрон, как известно, обладает волновыми свойствами. Длина волны λ электрона зависит от его энергии и может быть определена из формулы де Бройля

$$\lambda = h / mV = h / \sqrt{2qmu} = \sqrt{1,5 / u},$$

где V , q , m – скорость, заряд и масса электрона;

u – направление ускоряющего электрического поля. Например, при $u = 15$ кВ $\lambda = 0,01$ нм.

В отличие от оптического и рентгеновского излучений поток электронов не является электромагнитным излучением. Электрон несет заряд, что позволяет фокусировать пучок электронов с помощью электрических и магнитных полей.

При попадании движущихся электронов в слой электронорезиста они теряют часть своей кинетической энергии за счет электростатического взаимодействия с электронами, входящими в состав молекулы резиста. В результате происходит выбивание электронов из молекул и образование ионов, которые в дальнейшем вступают в реакцию.

Ионная литография

Разрешающая способность ионной литографии составляет 0,1–0,2 мкм, т. е. выше электронной. Это объясняется незначительным боковым рассеянием ионов в резисте по сравнению с электронами благодаря их большей массе. Генерируемые ионами вторичные электроны обладают малой энергией и тормозятся в резистах на расстояниях, меньших сотой доли микрометра. Кроме того, резисты обладают значительно большей чувствительностью к ионам, чем к электронам, так как удельные потери энергии ионов в них значительно больше, чем электронов.

12.4. Изготовление фотошаблонов

Для современных фотошаблонов с нанометровыми элементами используются кварцевые заготовки с незначительными отклонениями показателя преломления от заданного значения, а также с жесткими требованиями к двойному лучепреломлению и показателю однородности. Традиционно в качестве не пропускающих УФ-излучение используются хромовые пленки. Обычная толщина пленки хрома 100 нм.

12.4.1. Нанесение фоторезиста на подложку фотошаблона

От качества фоторезистивной пленки во многом зависят характеристики фотошаблонов: четкость края, отсутствие невытравленных участков на белом поле, количество проколов (дырок) на элементах структуры фо-

тошаблона и т. п. Поэтому к технологической операции «нанесение фоторезиста» предъявляются исключительно жесткие требования как по чистоте среды и отсутствию механических загрязнений в растворе фоторезиста, так и по созданию условий хорошей адгезии фоторезистивной пленки к подложке при высокой равномерности толщины. Толщина пленки фоторезиста в зависимости от минимальных размеров элементов печатаемой структуры и от допустимых требований бездефектности пленки может колебаться от 0,3 до 1–2 мкм.

Приготовление растворов фоторезиста, его предварительная обработка и нанесение на стеклянную подложку должно осуществляться в специальном чистом помещении («чистой комнате» с допустимым количеством пылинок до 4 шт./л) и в скафандрах-боксах с поддувом обеспыленного воздуха, чтобы исключить попадание пылинок в слой фоторезиста.

После приготовления раствор фоторезиста необходимо центрифугировать на скоростной центрифуге в течение 2–3 ч для удаления остаточных механических включений.

В настоящее время для нанесения фоторезиста на подложку в основном используется метод центрифугирования. Такие методы, как пульверизация, напыление в электростатическом поле, пока не нашли достаточного распространения.

Сущность метода центрифугирования состоит в следующем. На диск центрифуги, встроенной в скафандр с обеспыленной средой, устанавливается металлизированная стеклянная заготовка слоем хрома вверх. В середину стеклянной пластины через фильтр типа «миллипор» шприцом наносят несколько капель фоторезиста. Включают вращение и под действием центробежной силы фоторезист тонкой пленкой растекается по поверхности. Толщина пленки зависит от вязкости фоторезиста, скорости вращения центрифуги и времени центрифугирования. Как установлено, толщина слоя фоторезиста, получаемая в результате длительного центрифугирования пленки, соизмерима с величиной граничного слоя, толщина которого может быть вычислена по формуле

$$\delta = 2,79\sqrt{\nu / \omega},$$

где ν – кинематическая вязкость фоторезиста;

ω – угловая частота вращения центрифуги.

На практике время вращения подбирается экспериментально, в зависимости от свойств применяемого фоторезиста. При недостаточно больших скоростях центрифугирования слой фоторезиста получается неоднородным, его краевое утолщение распространяется на большую часть подложки. Получить качественное фотографическое изображение на таких слоях невозможно. С увеличением числа оборотов центрифуги слой фоторезиста становится более однородным и его общая толщина уменьшается. Однако скорость вращения беспредельно увеличивать нельзя. После до-

стижения определенной оптимальной (для каждого типа фоторезиста) скорости дальнейшее ее увеличение не дает заметного улучшения равномерности слоя и приводит лишь к резкому увеличению числа дефектов в пленке фоторезиста. К тому же очень тонкие пленки фоторезиста менее стойки к применяемым травителям.

Нанесенную любым способом пленку фоторезиста необходимо термически обработать – просушить. Обычно операция сушки выполняется в термостатах с обеспыленной средой воздуха или азота при температуре около 80 °С в течение 30–40 мин.

Ускорение процесса сушки может быть достигнуто применением инфракрасного лучевого нагрева, но при этом возрастают трудности стабилизации режима по площади пластины. Трудности снижаются при движении кассеты в туннеле инфракрасной печи или на карусели термостата периодического действия.

12.4.2. Экспонирование фотошаблона

Экспонирование пленки фоторезиста является одним из ответственных процессов качественного изготовления фотошаблонов.

Принципиально возможны два метода экспонирования при изготовлении рабочих копий фотошаблонов: контактный и проекционный.

Для точной передачи структуры всего фотошаблона при контактной печати требуется обеспечить плотное (беззазорное) прилегание слоя фоторезиста к маскирующей пленке базового (эталонного) фотошаблона, равномерное освещение коллимированным световым потоком определенной длины волны и заданную необходимую выдержку.

Обычно в качестве источника света используется ртутно-кварцевая лампа высокого давления типа ДРШ-500 (или ДРШ-250) или подобная ей. Лампа имеет высокоинтенсивное сосредоточенное светящееся пятно, излучающее близкий к линейчатому спектр с пятью основными пиками в диапазоне длин волн от 350 до 600 нм, что перекрывает область наибольшей чувствительности фоторезистов.

Для получения качественных фотошаблонов достаточно проводить экспонирование расходящимся пучком лучей от лампы, отстоящей от фотопластины на 700–800 мм. Однако наилучшие результаты получаются при формировании светового пучка с помощью специального конденсора из кварцевого или увиолевого стекла. При этом для улучшения равномерности освещения по полю диафрагмирование светового пучка необходимо осуществить дважды: перед входом в конденсорную систему и перед выходом в зону экспонирования.

Учитывая значительную зависимость размеров элементов изображения от величины экспозиции, допустимая неравномерность освещения в плоскости экспонирования не должна быть хуже 2–3 %, что контролируется сканирующим фотометром.

Применение светофильтров при контактной печати с целью выбора монохроматического света одной из спектральных линий не рекомендуется во избежание появления стоячих волн, возникающих в результате интерференции падающего и отраженного от пленки хрома луча, что может привести к резкой зависимости результатов экспонирования от минимальных отклонений толщины фоторезистивной пленки.

Выбор экспозиции осуществляется опытным путем. При этом оператор должен знать общий характер изменения растворимости фоторезиста в зависимости от экспозиции. Следует также иметь в виду, что ртутно-кварцевая лампа входит в установившийся режим в течение 15–20 мин. Поэтому экспонирование следует начинать только после полного прогрева лампы.

12.4.3. Фотохимическая обработка фотошаблонов

Фотохимическая обработка экспонированных фотошаблонов включает следующие операции:

- а) проявление изображения и промывку;
- б) задубливание фоторезиста;
- в) травление пленки хрома;
- г) снятие фоторезиста;
- д) финишную промывку.

Выполнение названных операций, особенно операций а) и в), должно быть проведено с исключительной тщательностью в стабилизированных условиях, так как эти операции в значительной мере определяют размеры элементов фотошаблона, качество края и отсутствие невытравленных окон.

Для проявления фоторезистовых пластин, изготовленных на основе позитивного фоторезиста, например ФП-27, используются два принципиально различных типа проявителей: глицериновый и щелочной. Глицериновый проявитель представляет собой 1%-й раствор тринатрийфосфата в водоглицериновом составе.

Этот проявитель хорошо работает с механическим перемешиванием посредством покачивания ванны для проявления, которая может осуществляться либо от электродвигателя, либо с помощью специальной вибрационной установки, сообщающей вибрацию раствору с частотой сети 50 Гц.

Однако лучшие результаты по качеству края и скорости проявления можно получить, используя раствор небольшой концентрации едкого калия в воде (около 0,3 %).

После проявления пластины направляют на операцию задубливания фоторезиста, которая осуществляется в течение 30 мин в обеспыленном термостате при температуре 120 °С. Здесь так же, как и при сушке фоторезиста, целесообразно использовать радиационный нагрев, что сократит время задубливания.

Дальнейшая обработка – травление хрома в окошках фоторезиста – является одной из наиболее ответственных и трудноконтролируемых операций.

Травление осуществляется в термостабилизированных условиях в растворе соляной кислоты. Перед этим пластина орошается водой для лучшего смачивания травителем, затем опускается в травитель.

Для восстановления поверхностей окисной пленки между пленкой и другим электродом, опущенным в травитель, пропускают импульс постоянного тока или алюминиевой палочкой просто касаются хрома на стеклянной подложке фотошаблона, не защищенной фоторезистом, что создает гальваническую пару, и в результате между пленкой хрома и травителем также проходит импульс тока. Начинается бурное травление хрома с выделением пузырьков газа, которые могут привести к невытравливанию части элементов структур. С целью удаления пузырьков рекомендуется интенсивное движение травителя или его вибрация с амплитудой до 3–5 мм. В особо ответственных случаях травление целесообразно проводить в два этапа с остановкой через 5–7 с после начала травления, переносом пластины в ванну с дистиллированной водой, а затем повторным травлением алюминиевой палочкой.

В процессе травления важно точно определить его окончание и перенести пластину под водяной душ. Обычно это регистрируется по времени. Однако в силу значительного разброса характеристик хромовых пленок время травления может колебаться от 1,5 до 2 раз. При этом передержка в травителе приводит к растравливанию окон, увеличению их размеров, а также к появлению волосяных трещин в слое хрома на резких углах структур, где механические напряжения пленки хрома концентрируются в наибольшей степени. В таких случаях наилучшие результаты может дать фотоэлектрический контроль пропускающей способности травимой пленки.

После операции травления осуществляются обзорный контроль фотошаблона под микроскопом и выборочный контроль размеров. При необходимости возможно некоторое дотравливание окон в травителе на основе церия следующего состава:

церия сернокислого марки И	– 200 мл;
соляной кислоты	– 100 мл;
серной кислоты	– 10 мл;
воды дистиллированной	– до 100 мл.

Процесс снятия фоторезиста проводится в 50%-м растворе едкого калия, в котором пластина выдерживается до полного растворения фоторезиста (обычно 1,2–2 мин), после чего в течение нескольких минут промывается поролоновой губкой в струе горячей (60–70 °С) воды.

После операции удаления фоторезиста фотошаблон передается для проведения тщательного контроля его качества, а в случае необходимости – для ретуши и исправления дефектов.

12.4.4. Контроль готовых фотошаблонов и их дефекты

Контроль фотошаблонов осуществляется с целью измерения размеров элементов фотошаблона, определения соответствия этих размеров указан-

ным в чертеже с учетом допуска на размер, а также на наличие и плотность дефектов.

Контроль размеров осуществляется на измерительных проекторах и микроскопах.

Наиболее трудоемкой является операция контроля дефектов и их плотности. Дефекты фотошаблонов чрезвычайно разнообразны как по виду, так и по вызвавшим их причинам. Это могут быть дефекты стекла – царапины, выколки, свили; дефекты пленки хрома – проколы, неравномерность толщины и оптической плотности, крупные кристаллиты, выступающие над поверхностью пленки; протравившиеся отверстия в пленке хрома соответственно дефектам в пленке фоторезиста, островки хрома и другие дефекты.

В отдельных случаях фотошаблоны направляются на исправление дефектов, в первую очередь на снятие островков хрома и ретуширование проколов. Ретуширование дырок осуществляется методом их запыления хромом. С этой целью фотошаблон покрывается сплошной лаковой пленкой, в которой в соответствующих местах вскрываются окна. Напыляемый хром заполняет участки фотошаблона соответственно вскрытым окнам. После этой операции лаковая пленка снимается и фотошаблон готов для передачи заказчику.

Изготовить фотошаблон с несколькими миллиардами элементов почти невозможно без дефектов в его прозрачных и непрозрачных элементах. Дефектом фотошаблона считается любое нарушение топологии. Для обнаружения дефектов существуют специальные измерительные установки, которые позволяют обнаружить отклонение топологии данного фотошаблона от проектного рисунка. Для упорядочивания требований к дефектам они стандартизированы по 32 типам. Согласно стандарту SEMY P23–93 любой дефект на фотошаблоне, в том числе загрязнения, приводит к повторяющемуся дефекту в каждом элементе. Для снижения влияния загрязнений на некотором расстоянии от поверхности фотошаблона укрепляют тонкую, прозрачную для экспонирующего излучения пленку, так называемую пелликулу. Пелликула закреплена на рамке на таком расстоянии, чтобы пылинки на пелликуле при экспонировании не создавала резкого изображения в слое фоторезиста.

Как правило, в чистой зоне и климатической камере, где установлен фотошаблон, размер пылинок не превышает микрона, поэтому они, находясь на пелликуле на расстоянии 5–6 мм от рабочей плоскости фотошаблона, не создают резкого изображения и не приводят к дефектам на пластине. Толщина пелликулы зависит от длины волны применяемого для экспонирования излучения и кратна длине волны. Разнотолщинность пленки не должна превышать 210-й доли длины волны.

12.5. Основное технологическое оборудование для получения фотошаблонов

12.5.1. Генераторы с одиночным фотонабором

Одиночный фотонабор – первый и до сих пор применяемый метод генерирования изображений. При одиночном фотонаборе изображения фигур топологического рисунка на заготовке фотошаблона набираются последовательным экспонированием прямоугольных элементов, размерами которых, расположением и углом поворота можно управлять. Пример фотонабора приведен на рис. 12.10.

Так как топологии фотошаблонов содержат фигуры, ограниченные прямолинейными контурами, одиночный набор позволяет генерировать изображения практически всех топологий.

Реализация одиночного фотонабора в генераторах изображения схематически и представлена на рис. 12.11.



Рис. 12.10. Одиночный фотонабор изображения фигуры топологического рисунка

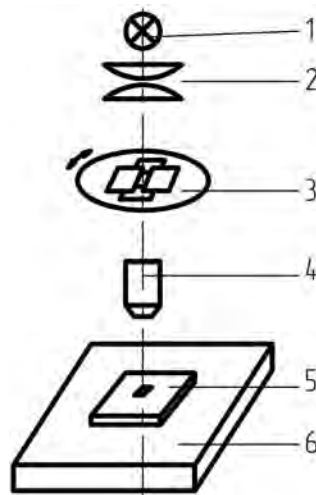


Рис. 12.11. Схема реализации одиночного фотонабора в генераторах изображения

Здесь свет от источника 1 через конденсор 2 освещает наборную диафрагму 3, формирующую прямоугольный элемент. Проекционный объектив 4 создает изображение на слое фоторезиста на подложке 5, установленной на координатном столе 6. Перемещением двух пар взаимно перпендикулярных шторок наборной диафрагмы можно изменить размеры наборного элемента по обеим осям X и Y . Поворотом всей диафрагмы на заданный угол можно изменить наклон элемента. Перемещение подложки координатным столом по двум осям X и Y позволяет формировать топологический рисунок на подложке. Работой источника света, наборной диафрагмой и координатным столом управляет электронная система. Для сохранения поверхности подложки в плоскости резкого изображения объек-

тива применяется система автоматической фокусировки. Информация о топологии фотошаблона поступает в управляющую систему, которая преобразует ее в команды, управляющие всеми устройствами генератора.

Для подготовки программы управления работой генератора топологический рисунок разбивается на прямоугольные элементы разного размера и расположения. Набор элементами максимальных размеров позволяет получить большую производительность. Во избежание переэкспонирования топологический рисунок разбивают на не перекрывающиеся друг друга прямоугольники.

12.5.2. Установки совмещения и экспонирования контактным (теневым) методом

Простейшим методом формирования топологии является контактный, хотя правильнее его называть теневым. Наибольшим приближением к теоретическому контактному методу необходимо считать перенос топологии фотошаблона при абсолютном контакте на тонкий слой фоторезиста при полном отсутствии зазоров между ними. Практически такой метод не реализуем, хотя и известны попытки применения гибких тонких фотошаблонов, с помощью которых возможен беззазорный контакт. При беззазорном контакте в тонком слое фоторезиста можно сформировать топологию с разрешающей способностью до размеров молекул. В реальных процессах контактного переноса топологии фотошаблона на толстый слой фоторезиста возникают зазоры и деформации подложки и фотошаблона, из-за чего снижается разрешение и возникают геометрические искажения топологии. Зазоры при контакте носят случайный характер и обусловлены неплоскостностью подложки и фотошаблона, а также попаданием между ними посторонних частиц. При теневом методе переноса топологии фотошаблона в толстый слой фоторезиста на подложке возникает ряд оптических эффектов, искажающих изображение элементов фотошаблона в слое фоторезиста.

Проанализируем причины появления искажений изображения. Такими причинами могут быть: неколлимированность освещения; перераспределение света в изображении щели из-за переотражений на границах раздела фаз; дифракционные явления на краях щели; рассеяние света в оптически неоднородном слое фоторезиста; интерференция: стоячих волн в слое фоторезиста и др.

Неколлимированность потока света в современных осветительных системах обычно составляет градус и менее. На краю элемента это явление создает полутень шириной 0,15–2,8 мкм (явление дифракции), в которой освещенность изменяется пропорционально поглощающей способности фоторезиста, что приводит к искажению изображения топологии фотошаблона.

Прошедший через покрытие свет интерферирует с дифрагированным излучением, в результате чего также возникают искажения в изображении фотошаблона. Хотя это излучение составляет всего 1–2 % от падающего,

контраст интерференционной картины равен 0,33–0,43 и в изображении края элемента возникает двойной край. Наибольшие искажения из-за этих эффектов проявляются в углах элементов.

Дифракционные эффекты устранить полностью принципиально невозможно, но их можно снизить, уменьшая зазоры и длину волны излучения (например, перейти от 436 к 200 нм). Изменение размера элемента из-за дифракции зависит от величины зоны Френеля, т. е. погрешность формирования ширины элемента изменяется пропорционально величине 2λ . Отсюда следует, что уменьшение длины волны снижает влияние дифракции. Уменьшение зазоров и толщины резиста также снижает это влияние. На практике минимально возможный зазор зависит в первую очередь от неплоскостности полупроводниковой пластины и фотошаблонов. Увеличение усилия прижима неплоских поверхностей подложки и фотошаблона не уменьшает зазор, а вызывает дополнительные искажения топологии фотошаблона из-за деформаций, поэтому такой способ борьбы с дифракцией неприемлем.

Многочисленные отражения от зеркальной поверхности хромового покрытия и подложки зависят от их коэффициента отражения и степени поглощения света в фоторезисте и полупрозрачных слоях пластины. Эти отражения приводят к освещению теневых зон на краях элемента, а интерференция данного излучения с дифрагированным приводит к снижению точности формирования размера элемента. Для борьбы с отмеченными явлениями применяются поглощающие покрытия на фотошаблоне, например, окисление хрома (так называемый черный хром) и в результате создание поглощающего слоя под фоторезистом. Рассеяние света в фоторезисте пропорционально четвертой степени длины волны и оптической неоднородности резиста. Снижение этого эффекта возможно путем тщательной фильтрации и регулярного контроля мутности (прозрачности) фоторезиста. Стоячие волны возникают в результате интерференции падающего и отраженного от подложки света. Их величина и интенсивность зависят от степени монохроматичности и когерентности экспонирующего излучения и отражающих свойств на границах фаз «фоторезист–кремний–окисел». Очевидно, эффект стоячих волн более всего будет проявляться в слое фоторезиста, нанесенного на зеркальную алюминиевую пленку при монохроматическом освещении.

Применение немонахроматического излучения снижает эффект стоячих волн.

Перечисленные выше эффекты суммируются на краю элемента. Экспозиция в этой зоне значительно отличается от центральной части элемента. Модель такого процесса SPLAT (изменения фазы на краю элемента), разработанная Диплом, позволяет рассчитать изменения экспозиции для разнообразных сочетаний факторов, вызывающих изменения освещенности на краю, и создает возможность прогнозировать трансформацию размеров при назначении различных экспозиций.

Для точного переноса изображения фотошаблона на подложку в установках контактной и теневой литографии в качестве источников света при-

меняют ртутные и ртутно-ксеноновые лампы. Для экспонирования обычно используют область ближнего или дальнего ультрафиолетового излучения, которую из спектра источника вырезают с помощью дихроичных зеркал, отражающих только отдельные линии (h, g, I) излучения ртутной лампы.

Глава 13. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ШАРОВИДНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТЕКЛА

13.1. Предварительная обработка шариков по классической технологии

Положительные линзы с радиусами кривизны менее 15 мм составляют класс оптических деталей, обрабатываемых по технологии получения шаровидных деталей. Необходимость разработки этой технологии вызвана большой трудоемкостью обработки обычными средствами таких деталей с погрешностью оптических поверхностей $N \leq 1$, $\Delta N \leq 0,1$ и чистотой P не грубее 2-го класса.

Характерными особенностями изготовления деталей данного класса по технологии получения шаровидных деталей являются шлифование и полирование сферической поверхности в свободном состоянии, т. е. без закрепления заготовок на клеучном приспособлении.

Заготовки будущих шариков делают в виде кубиков (нарезают из пластины), которым в результате грубого шлифования (галтовки) придают предварительную форму шара.

Первая стадия обработки выполняется на специальном станке типа центрифуги (рис. 13.1), состоящем из цилиндрического неподвижного корпуса 1, шпинделя 2 с закрепленным на нем абразивным кругом 3 и крышки 4.

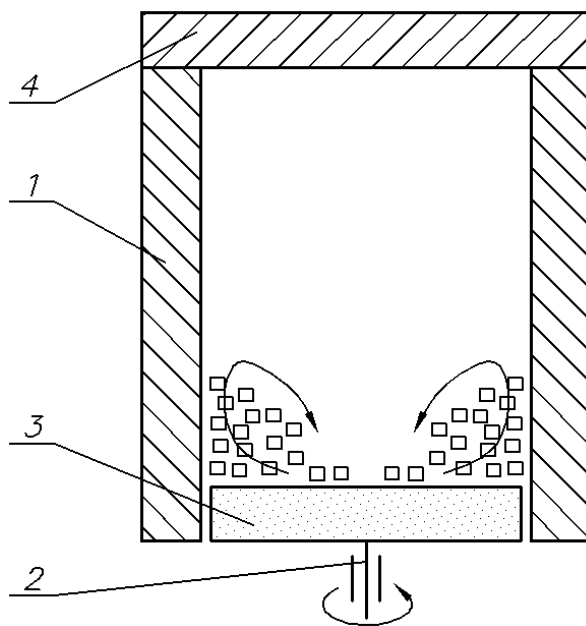


Рис. 13.1. Станок для галтовки стеклянных шариков

Кубики, находящиеся на вращающемся шлифовальном круге 3, вследствие трения о его поверхность получают вращательное движение. Одновременно под действием центробежной силы кубики перемещаются к внутренней поверхности неподвижного корпуса 1. При этом нижние постепенно перемещаются кверху. Самый верхний ряд кубиков скатывается на центральную зону круга, свободную от кубиков. Такое постоянное перемещение заготовок обеспечивает их обработку по периметру. Партия загрузки составляет 200–1500 кубиков. Время обработки, в зависимости от размера кубиков, составляет 6–15 ч.

Недостатком этого способа формообразования шариков является отсутствие гарантированного многоосного (трехосного) вращения кубиков в рабочей зоне станка, в результате чего форма обработанных заготовок имеет невысокую степень приближения к шаровидной. Данному недостатку способствует также плоский профиль рабочей поверхности инструмента. В таком случае имеется высокая вероятность контактирования кубика с инструментом своими гранями, а не ребрами, что необходимо для образования шара из куба. Кроме этого, многие заготовки разрушаются при соударении друг с другом, что существенно снижает выход годных изделий. К недостаткам рассматриваемого способа также следует отнести невозможность проведения активного контроля диаметра обрабатываемых шариков (контроля непосредственно в процессе изготовления), следствием чего является получение шариков с отклонением от сферической формы и разноразмерностью до 1,8 мм в пределах партии.

Целью второй стадии операции предварительной обработки является придание всей партии заготовок шариков правильной геометрической формы и одинакового размера. Обработку заготовок выполняют на полуавтомате (рис. 13.2).

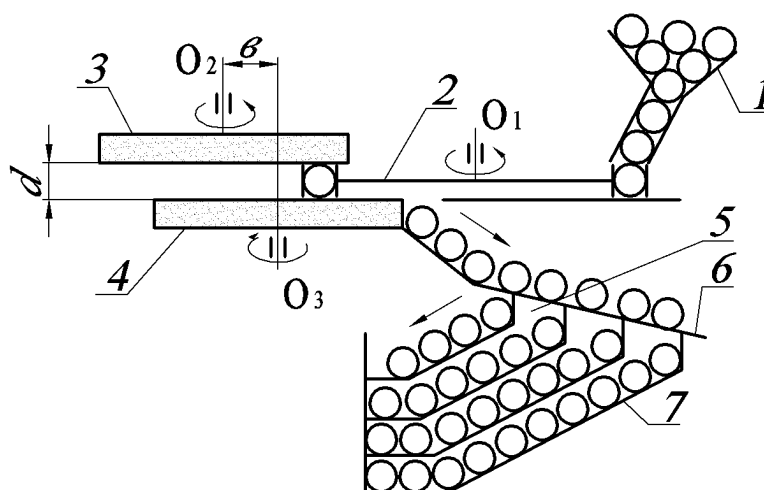


Рис. 13.2. Полуавтомат для второй стадии шлифования стеклянных шариков

Шарики из вибробункера 1 по лотку попадают в отверстие сепаратора 2, вращающегося с постоянной скоростью вокруг оси O_1 . Увлекаемые сепаратором шары движутся по лотку 5 к шлифовальному кругу 3, вращающемуся с постоянной скоростью вокруг оси O_2 . Шарики, находясь на шлифовальном круге, получают вращательное движение. Одновременно под действием центробежной силы шары перемещаются к внутренней поверхности неподвижного корпуса 1. При этом нижние постепенно перемещаются кверху. Самый верхний ряд шаров скатывается на центральную зону круга, свободную от шаров. Такое постоянное перемещение заготовок обеспечивает их обработку по периметру. Партия загрузки составляет 200–1500 шаров. Время обработки, в зависимости от размера шаров, составляет 6–15 ч.

ратором шарики перемещаются в зазоре между двумя вращающимися навстречу один другому абразивными кругами 3 и 4, оси вращения O_2 и O_3 которых смещены на величину b . Эксцентриситет b способствует тому, что шарикам придается сложное вращательное движение, обеспечивающее получение ими правильной геометрической формы. Диаметр шариков регулируется величиной зазора d между абразивными кругами. Прошедшие обработку шарики по лотку направляются в сортировочное устройство 5, в котором прокатываются вдоль щели, образованной лезвиями двух ножей 6, развернутых один относительно другого на некоторый угол. Катящиеся по лезвиям ножей шарики по мере увеличения зазора между ножами проваливаются в кассы 7, соответствующие определенным размерам шариков.

Недостатками обработки на данном полуавтомате являются влияние вибрации абразивных кругов на точность и малое время пребывания шарика в рабочей зоне, в результате чего получаются детали с отклонением от сферической формы и разноразмерностью до 0,2 мм в пределах партии.

13.2. Метод пневмоцентробежной обработки шариков

Сущность метода пневмоцентробежной обработки заключается в том, что заготовки кубической формы, помещенные между соосно расположенными инструментами с коническими рабочими поверхностями, вращают вокруг оси последних посредством среды под давлением.

Схема устройства для реализации рассматриваемого метода содержит инструменты 1 и 2 (рис. 13.3), по периферии снабженные рабочими участками в виде алмазозносных конических колец 3.

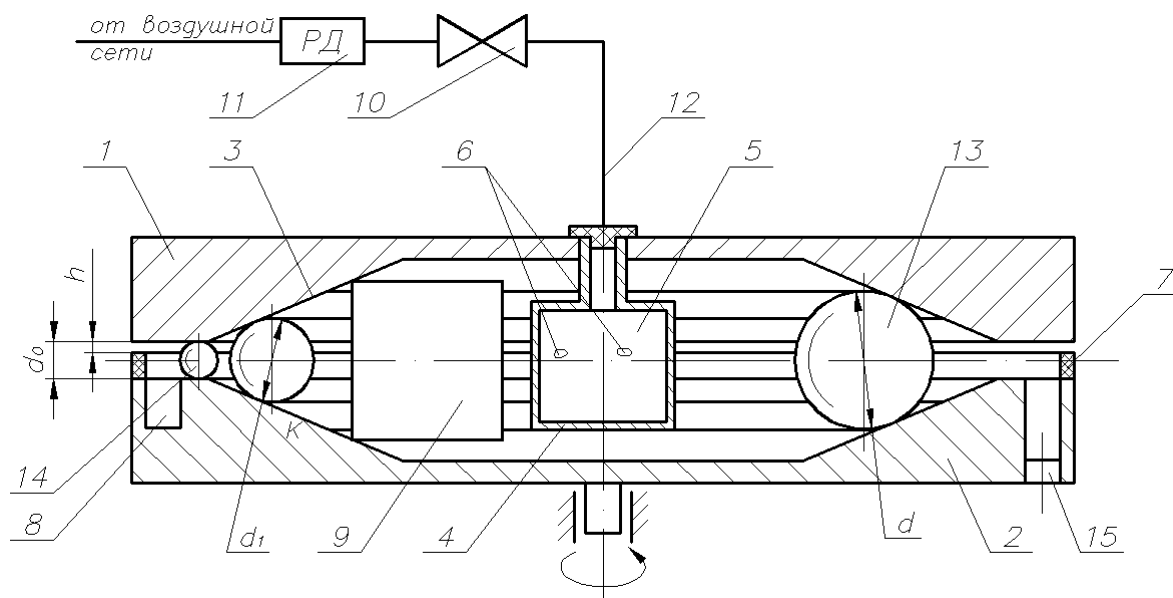


Рис. 13.3. Устройство для центробежной обработки шариков

Инструменты расположены соосно с зазором, величину d_0 которого устанавливают равной диаметру готового шарика. На верхнем инструмен-

те укреплен полый цилиндр 4, снабженный камерой расширения 5 с тангенциальными соплами 6 в его боковой поверхности, а на нижнем – кольцо 7, которое направляет выходящие из рабочей зоны готовые шарики в наклонную канавку 8. Для выхода отработанного воздуха между кольцом 7 и инструментом 1 имеется зазор шириной h .

Устройство работает следующим образом. Заготовки 9 в виде кубиков с размером ребра a помещают в рабочую зону и открывают вентиль 10. В результате сжатый воздух от воздушной сети через регулятор давления 11 по воздухопроводу 12 попадает в камеру расширения 5 и, проходя через тангенциальные сопла 6, разгоняет заготовки 9 до рабочей переносной скорости вокруг общей оси симметрии инструментов 1 и 2 вдоль алмазного рабочего участка. В результате заготовки 9 приобретают шаровидную форму диаметром d (шарик 13). В процессе дальнейшего формообразования шарики принимают окончательный размер диаметром d_0 (шарик 14) и после выхода из рабочей зоны по наклонной канавке 8 скатываются в сторону отверстия 15 в инструменте 2, через которое направляются на последующую операцию.

13.3. Модернизированное устройство для пневмоцентрированной обработки шариков

В устройстве, рассматриваемом в п. 13.2, усилие на заготовку обеспечивается только за счет давления рабочей среды (например, сжатого воздуха), что не позволяет существенно повысить производительность обработки из-за ограниченного значения этого давления (0,4–0,6 МПа) в производственных условиях. С целью устранения этого недостатка предлагается модернизированное устройство, конструкция которого показана на рис. 13.4.

Устройство состоит из нижнего 1 и верхнего 2 соосно расположенных рабочих дисков, на обращенных друг к другу поверхностях которых закреплены нижний 3 и верхний 4 абразивные сегменты. При этом на боковой поверхности нижнего рабочего диска 1 смонтировано кольцо 5 с профильным рабочим торцом 6. Это кольцо с нижним абразивным сегментом 3 образует круговую канавку 7 для накопления готовых шариков 8, выгружаемых через закрытое пробкой 9 отверстие 10 в нижнем рабочем диске 1. На наружной поверхности верхнего рабочего диска 2 закреплены кронштейн 11 с регулировочным винтом 12, головка которого входит в паз втулки 13, установленной с возможностью перемещения вдоль стойки 14 кронштейна 11. Во втулке 13 расположена ось 15, на которой через подшипник смонтирован ролик 16. На верхнем рабочем диске 2 закреплены также хомут 17 и штуцер 18, несущий камеру расширения 19 с тангенциальными соплами 20. Для загрузки заготовок 21 в рабочую зону 22 в верхнем рабочем диске 2 имеется отверстие 23, закрытое пробкой 24.

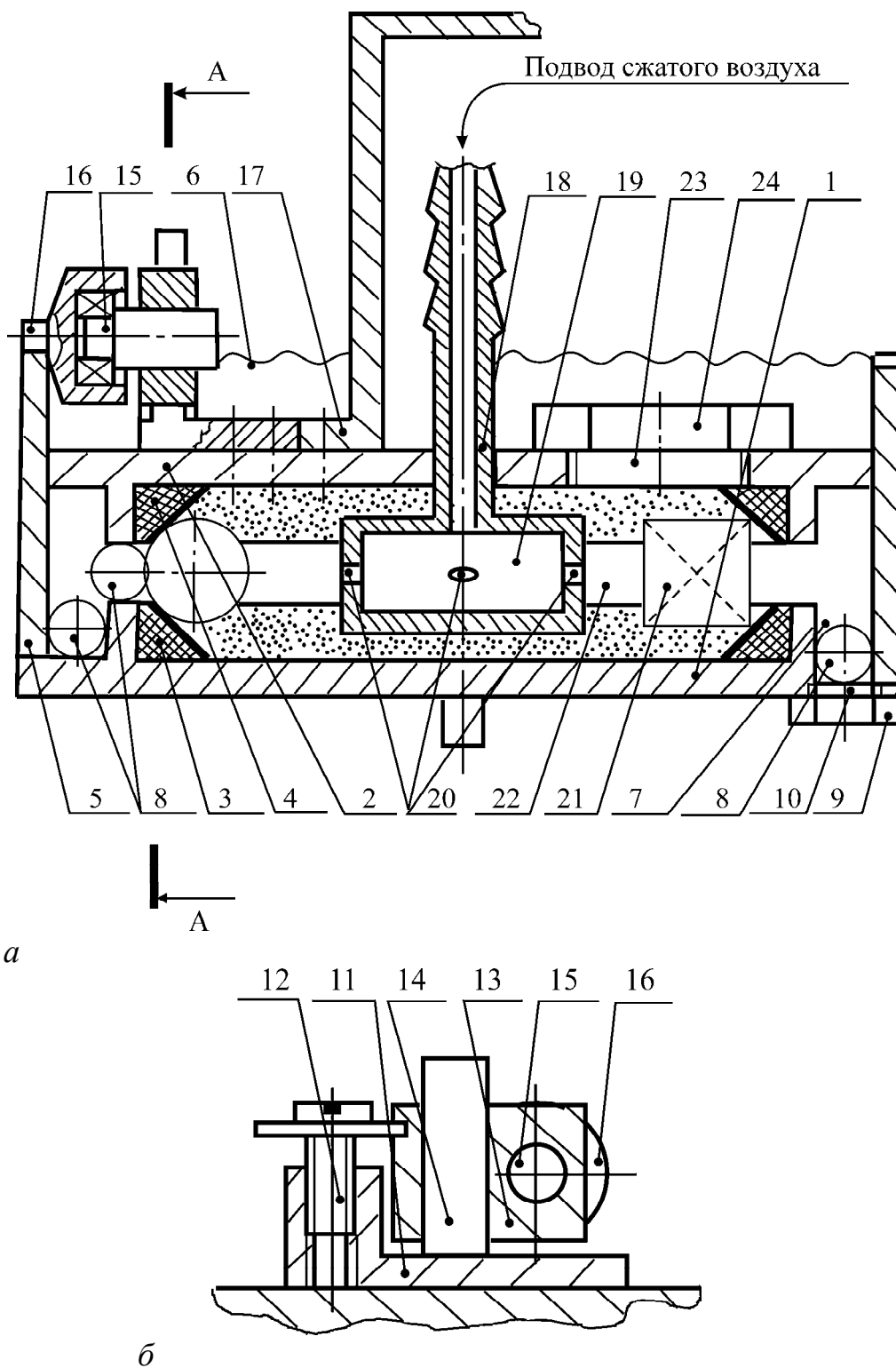


Рис. 13.4. Модернизированное устройство для центробежной обработки шариков

Устройство работает следующим образом. Первоначально посредством хомута 17 создают относительное вращение верхнего диска 2, обеспечивая возможность его переносного возвратно-поступательного перемещения. Затем вращением регулировочных винтов 12 верхний рабочий диск 2 смещают вдоль его оси симметрии до получения требуемого расстояния

между верхним 2 и нижним 1 рабочими дисками при нахождении ролика 16 на возвышенности профильного рабочего торца б. Далее открывают пробку 24 и через отверстие 23 заготовки 21 загружают в рабочую зону 22, а затем через штуцер 18 подают среду под давлением (например, сжатый воздух) в камеру расширения 19. Выходя через тангенциальные сопла 20, данная среда приводит заготовки 21 в движение вокруг оси симметрии нижнего 1 и верхнего 2 рабочих дисков вдоль абразивных сегментов 3 и 4. После этого в движение приводят нижний рабочий диск 1 (привод не показан) вместе с кольцом 5 и профильным рабочим торцом б, который через ролик 16, ось 15, втулку 13, регулировочный винт 12 и кронштейн 11 вызывает переносное возвратно-поступательное перемещение верхнего рабочего диска 2 с верхним абразивным сегментом 4. В момент сближения рабочих дисков 1 и 2 друг относительно друга происходит смещение заготовок к их оси симметрии, а при увеличении расстояния между дисками заготовка смещается от упомянутой оси.

По мере обработки исходная заготовка 21 превращается в шарик 8, который в момент приобретения заданного размера выходит из рабочей зоны 22 и попадает в наклонную канавку 7. При накоплении шариков в канавке 7 открывают пробку 9 и через отверстие 10 выгружают готовые шарики.

При использовании предлагаемого устройства заготовки в процессе обработки постоянно находятся в контакте с режущими участками, и на них дополнительно воздействует усилие верхнего рабочего диска, что позволяет повысить производительность обработки шариков из хрупких материалов.

13.4. Устройство для формообразования шаровидных деталей широкого диапазона диаметров

Рассмотренные в п. 13.2 и 13.3 устройства для ПЦО целесообразно использовать при получении шариков диаметром до 9 мм. В случае более крупных заготовок из-за уменьшения их скорости вращения эффективности обработки на данных устройствах заметно снижается. Эта проблема успешно решается, если применить устройство, состоящее из основания 1 (рис. 13.5) прямоугольной формы, в котором смонтированы направляющие 2, несущие фиксирующие сухарики 3 и расположенные между ними держатели 4 с инструментальными втулками 5, снабженными сферическими алмазонасными лунками для исходных заготовок некруглой формы б и пружинами 7. В одной из боковых поверхностей основания установлены зажимные винты 8, а находящийся на пересечении его диагоналей фиксирующий сухарик снабжен хвостовиком 9. Устройство закрепляют на шпиндель 10 базового станка, а на заготовки б помещают планшайбу 11 с наклеенной листовой резиной 12 и шарнирно соединяют ее с поводком 13 выходного звена исполнительного механизма станка.

Устройство работает следующим образом. Первоначально в сферические лунки инструментальных втулок 5 помещают заготовки б и устрой-

ство закрепляют на шпиндель *10* базового станка. Затем на заготовки *6* устанавливают планшайбу *11* с листовой резиной *12* и отвинчивают зажимные винты *8* в основании *1*, что приводит к некоторому смещению фиксирующих сухариков *3* по направляющим *2* в сторону винтов *8* и осевому перемещению под действием пружин *7* держателей *4* с инструментальными втулками *5* и заготовками *6*, способствуя расположению последних в горизонтальной плоскости. После этого завинчивают зажимные винты *8*, фиксируя сухариками *3* достигнутое положение держателей *4*. Далее в сферическую лунку планшайбы *11* вводят шаровидный наконечник поводка *13* выходного звена исполнительного механизма базового станка, включают вращение его шпинделя *10* и возвратно-вращательное движение поводка *13*. При этом устройство с заготовками *6* совершает вращение, планшайба *11* – переносное возвратно-вращательное перемещение, а под действием сил трения заготовок *6* о резину – и относительное вращение вокруг оси симметрии поводка *13*. В результате сочетания этих движений и благодаря сцеплению резины *12* с заготовками *6* последние совершают сложное (трехосное) вращение относительно инструментальных втулок *5*. В случае необходимости к планшайбе *11* через поводок *13* прикладывают рабочее усилие требуемой величины.

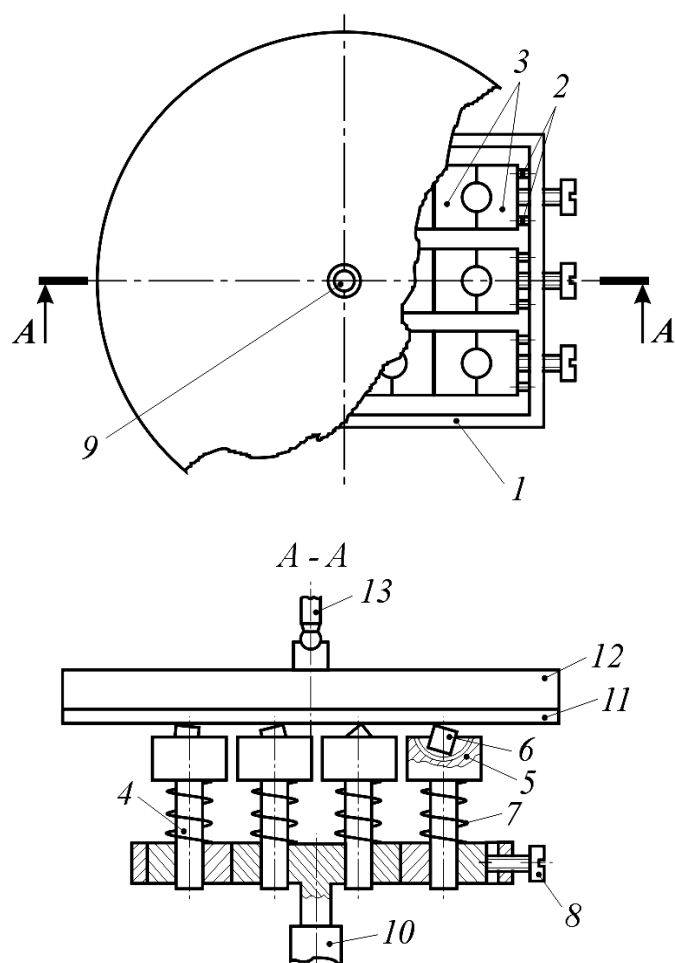


Рис. 13.5. Устройство для формообразования шаровидных деталей широкого диапазона диаметров

В процессе обработки в инструментальные лунки 5 периодически подают СОЖ специального состава.

13.5. Классические методы шлифования и полирования стеклянных шариков

13.5.1. Шлифование

Шлифование выполняют на станке (рис. 13.6), нижнее звено которого представляет собой планетарно перемещающуюся планшайбу 1 с наклеенной листовой резиной 2.

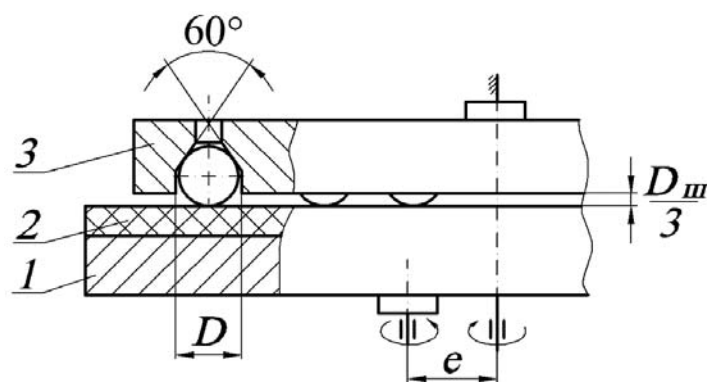


Рис. 13.6. Станок для шлифования стеклянных шариков

Верхним звеном является неподвижно закрепленный латунный шлифовальник 3, в котором высверлены сквозные фигурные отверстия. Нижняя часть последних имеет диаметр $D = D_{ш} + (0,2 \dots 0,5)$ мм, в зависимости от размера зерен применяемого абразива. Средняя часть имеет коническую форму с углом 60° . Глубину конического отверстия выполняют такой, чтобы обеспечить выступание шариков наружу на $(1/3) D_{ш}$. Так как коэффициент трения стекла о резину больше, чем стекла о латунь, то шарики начинают свободно вращаться в конических лунках. Коническая поверхность выполняет функцию шлифовальника переменного радиуса кривизны. Реализация многоосного вращения шарика в лунке осуществляется планетарной кинематикой станка, обеспечивающей одинаковый съём припуска со всех заготовок. Шлифование выполняют абразивной суспензией М20, М14, М7 в три перехода. Суспензию подают сверху через цилиндрическую часть отверстий шлифовальника.

Эксцентриситет e планетарной передачи изменяют в зависимости от требуемой интенсивности процесса шлифования. С увеличением эксцентриситета скорость обработки возрастает.

Недостатком шлифования по рассматриваемой схеме является разноразмерность обрабатываемых шариков в партии. Эта погрешность возникает из-за того, что поступающие с предыдущей операции шарики непременно отличаются по диаметрам, а устройство не обеспечивает возможность

управления величиной съема припуска с деталей, находящихся в той или иной зоне шлифовальника. Кроме этого, технически сложно выполнить одинаковую глубину конической части всех отверстий в шлифовальнике.

13.5.2. Полирование

Полирование осуществляют на станке (рис. 13.7) в два перехода при помощи двух полировальников.

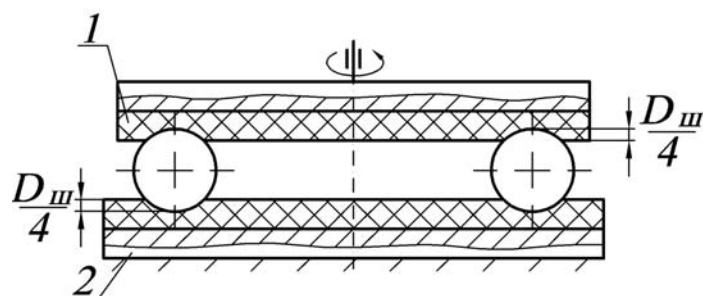


Рис. 13.7. Станок для полирования стеклянных шариков

Верхний полировальник *1* закреплен на вращающемся вертикальном шпинделе станка, а нижний *2* неподвижен. Для выполнения первого перехода используют полировальники, состоящие из смеси смолы с опилками мягких пород дерева, а для второго – из мягкой смолы. Полирующей суспензией служит полирит с водой $T : Ж = 1 : 1$. На обеих поверхностях полировальников протачивают канавки с одной установки реза, глубина канавок $0,25 D_{ш}$.

В канавки помещают стеклянные шарики вместе с разделительными пластмассовыми, которые предохраняют полируемые поверхности стеклянных шариков от царапин и выколов. Диаметр разделительных шариков выбирают на $0,1-0,5$ мм меньше обрабатываемых. После выполнения первого перехода все шарики сортируют по диаметрам через $0,1$ мкм на вертикальном оптиметре, снабженном специальным устройством, а после второго перехода контроль N и ΔN осуществляют на интерферометре.

Дальнейшую обработку шариков выполняют различно в зависимости от конструктивных особенностей линз.

13.6. Перспективный метод финишной обработки стеклянных шариков

Финишная обработка шариков сводится к их тонкому шлифованию и полированию и может быть выполнена с использованием устройства, аналогичного рассмотренному в п. 13.4, с заменой сферических инструментальных втулок *5* коническими *1* (рис. 13.8). При этом планшайбу *2* с листовой резиной *3* закрепляют на шпиндель *4* базового станка (напри-

мер, модели ШП или ПД), а в конические втулки 1 помещают шаровидные заготовки 5. В находящихся на пересечении диагоналей основания 6 фиксирующих сухариках 7 выполнена сферическая лунка 8, в которую устанавливают сферический наконечник поводка 9 выходного звена исполнительного механизма станка.

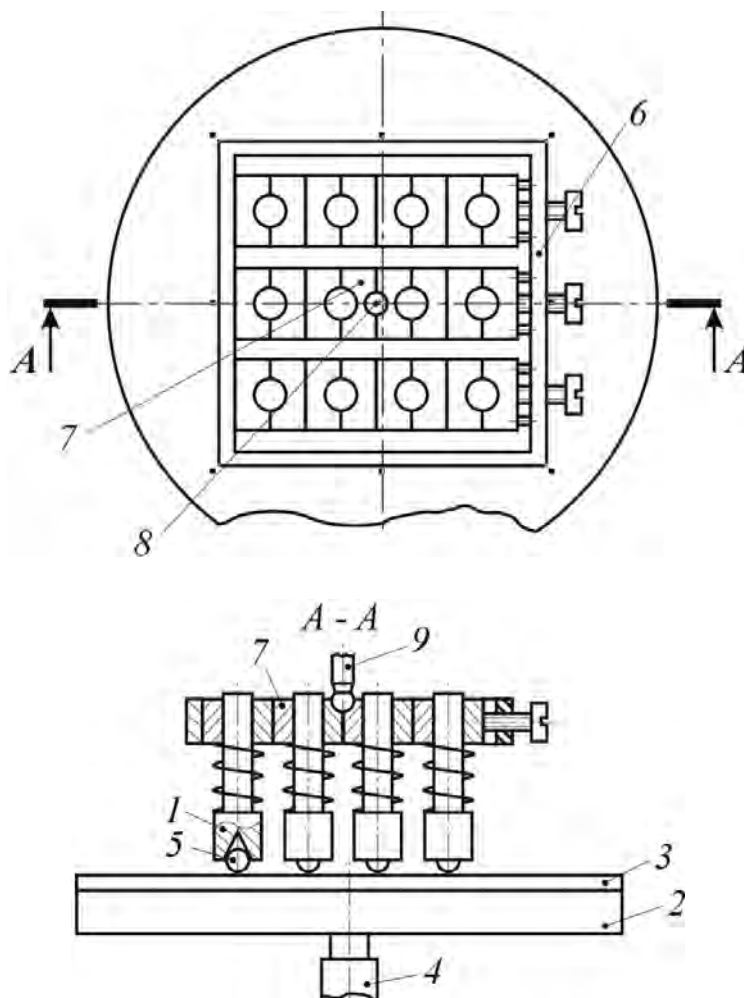


Рис. 13.8. Устройство для финишной обработки стеклянных шариков

В процессе обработки шлифующую и полирующую суспензии наносят на поверхность резины 3 и периодически проводят контроль диаметров шариков.

При эксплуатации рассматриваемого устройства возможно выпадание шариков из инструментальных втулок, что усложняет процесс обработки. Этот недостаток устраняется использованием составной инструментальной втулки, показанной на рис. 13.9. Она состоит из собственно инструментальной втулки 1 и резьбовой втулки 2, предохраняющей выход шарика 3 из рабочей зоны (выскакивание из инструментальной втулки). Инструментальная втулка выполняется в виде полого тонкостенного цилиндра (чем тоньше стенка, тем точнее сферическая поверхность шарика) и является самозатачивающимся инструментом. Для стадий тонкого шлифования и полирова-

ния ее изготавливают из соответствующих материалов. Высота h выступа шарика должна быть минимальной и подбирается экспериментально.

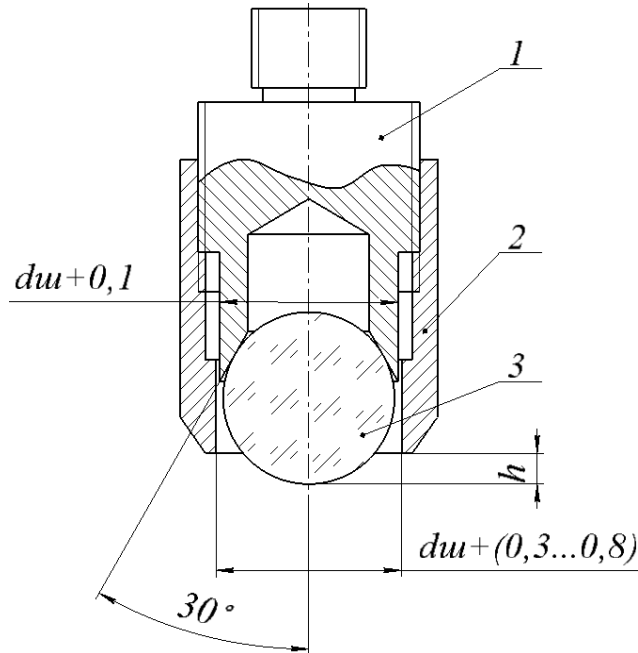


Рис. 13.9. Составная инструментальная втулка

13.7. Центрирование микролинз

При изготовлении микролинз в виде, например, положительного мениска с радиусами кривизны R_1 (выпуклый) и R_2 (вогнутый) полированные половинки стеклянных шариков 1 (рис. 13.10) устанавливают на базовую поверхность 2 наклеичного инструмента 3 и жестко фиксируют.

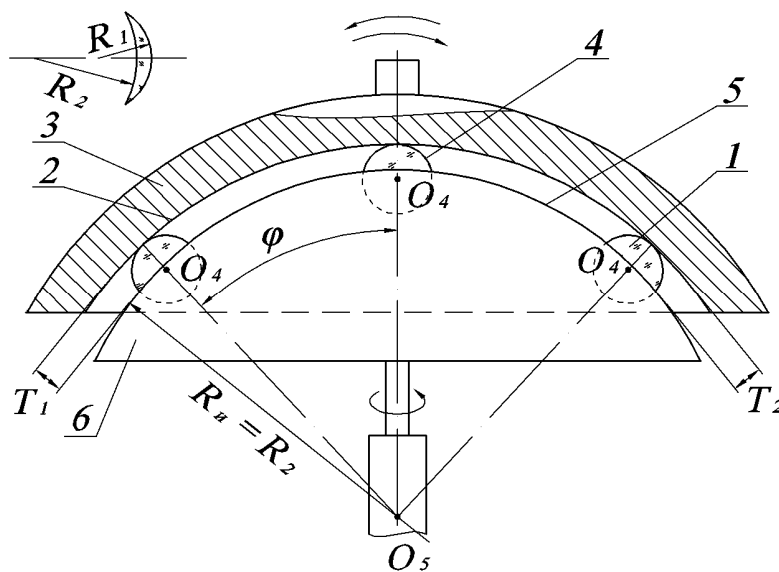


Рис. 13.10. Схема группового центрирования микролинз

При этом радиус кривизны R_0 поверхности 2 наклеечного приспособления 3 выбирают

$$R_0 = R_2 + t,$$

где t – толщина готовой микролинзы по центру.

При обработке поверхности радиусом R_2 контролируют максимальную разнотолщинность микролинз, расположенных в диаметрально противоположных точках краевой зоны наклеечного инструмента 3. Децентричность C деталей в этом случае определяется по формуле

$$C = \frac{T_1 - T_2}{2} \cos\varphi,$$

где φ – угол между осями симметрии микролинзы и инструмента 6.

Существенное отличие рассматриваемого способа центрирования микролинз от известных методов состоит в том, что при его использовании происходит совмещение операций обработки второй поверхности деталей и их центрирования (не требуется центрировочный станок), которое выполняется с высокой точностью. Кроме того, по данному способу реализуется групповое центрирование микролинз, в то время как по существующей технологии их центрируют поштучно.

Глава 14. ОБРАБОТКА КРИСТАЛЛОВ

14.1. Технологические свойства кристаллов

Ряд свойств кристаллических материалов усложняет процессы их механической обработки, затрудняет изготовление деталей с высокой точностью и качеством полированных поверхностей. В частности, механическая прочность и поверхностная твердость кристаллических материалов, как оптически изотропных, так и анизотропных, неодинаковы в различных кристаллографических направлениях. При изготовлении деталей из оптически анизотропных материалов это учитывают, выбирая положение преломляющих и отражающих (исполнительных) поверхностей. При $N > 5$ и P , соответствующем IV–IX классам, эти поверхности могут быть расположены в любом кристаллографическом направлении. Если $N < 5$, то исполнительные поверхности целесообразно ориентировать перпендикулярно оси роста кристалла. В этом случае их деформация, вызываемая перераспределением внутренних напряжений, будет одинакова. Для достижения максимально возможной чистоты полированных поверхностей их следует ориентировать по кристаллографическим направлениям с наибольшей поверхностной твердостью. Но в этом направлении прочность минимальна.

Из-за наличия у кристаллов плоскостей спайности и анизотропии механических свойств неровности рельефного и глубина нарушенного слоев шлифованной поверхности зависят от ее кристаллографического направления. В частности, трещины, образующиеся в результате воздействия зерен абразива, будут распространяться преимущественно по плоскостям спайности, где прочность материала наименьшая.

Некоторые кристаллы растворимы в воде и имеют малую твердость, что накладывает ограничения на режимы их механической обработки, выбор обрабатываемых и вспомогательных материалов. К таким кристаллам относятся NaF, NaCl, KCl, KBr, KI и др. Полировать такие кристаллы наиболее сложно. Качество обрабатываемой поверхности зависит от вида и зернистости абразива, жидкой фазы суспензии, упругоэластических свойств полировальника. Абразив должен быть тонкодисперсным и иметь однородный зерновой состав с тем, чтобы исключить разрушение полируемой поверхности единичными крупными зёрнами. Этим требованиям удовлетворяет окись хрома.

Рассеяние света микронеровностями полированной поверхности может быть снижено, если их размер будет меньше длины волны заданной области спектра. Для этого необходимо, чтобы роль жидкой фазы суспензии выполняла среда, которая уменьшает глубину врезания в кристалл зерен полирующего абразива за счет увеличения толщины несжимаемого слоя между поверхностью инструмента и изделия. Такими жидкостями могут быть глицерин и его смеси с водой. Для исключения царапин упругие свойства материала полировальника должны обеспечивать возможность нивелирования выступающей части крупных зерен под действием усилий, меньших по сравнению с вызывающими возникновение царапин. Таким материалом является воск, наносимый тонким слоем на поверхность смоляного полировальника.

При работе с кристаллами, содержащими токсичные вещества (таллий, цезий, мышьяк и др.), необходимо строгое соблюдение правил техники безопасности и охраны труда, в частности, обязательны максимальная герметизация оборудования, использование респираторов, резиновых перчаток и напальчников.

14.2. Механическая обработка кристаллов

14.2.1. Разрезка, распиливание, сверление

Выбор метода разделения кристаллов на заготовки определяется твердостью материала и растворимостью вещества в воде.

Кристаллы, растворимые в воде, можно разрезать с помощью нитевидной пилы, принцип действия которой основан на растворении материала движущейся влажной нитью (рис. 14.1).

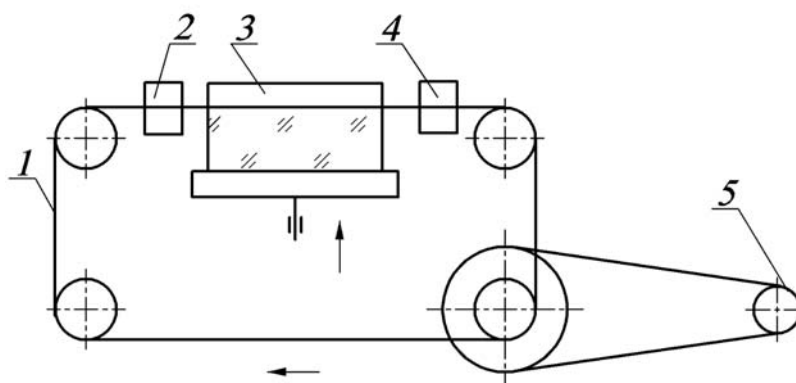


Рис. 14.1. Установка для разделения водорастворимых кристаллов

Увлажнитель 2 и опреснитель 4 нити 1 установлены соответственно перед ее входом в кристалл 3 и на выходе из него. Скорость движения нити, сообщаемая электродвигателем 5, составляет 0,5 м/с. Преимущество данного способа – отсутствие механических воздействий на кристаллическую решетку, прочность которой у данных веществ мала.

Кристаллы, имеющие совершенную спайность, например NaCl, разделяют на заготовки раскалыванием по плоскостям спайности. Раскалывание производят зубилом, устанавливая его острие на плоскость спайности. Некоторые кристаллы распиливают на заготовки алмазными отрезными кругами зернистостью 63/50 или тонким металлическим диском (полотном) со свободным абразивом М14.

Для сверления отверстий в кристаллах применяют то же оборудование и инструмент, что и при сверлении стекла. В качестве СОЖ при сверлении водорастворимых кристаллов используют насыщенные растворы их солей. Механическую прочность и термостойкость деталей из этих кристаллов повышают полированием боковой поверхности отверстий без применения абразива – за счет растворения вещества. Точности размера и правильности формы отверстия такая обработка не обеспечивает.

14.2.2. Шлифование кристаллов

Механизм процесса шлифования, его закономерности, деление на операции (грубое, среднее и тонкое шлифование) те же, что и при обработке стекла. В условиях серийного производства наиболее производительным способом выполнения операции грубого шлифования твердых кристаллов (SiO_2 , Al_2O_3 и др.) является обработка алмазным инструментом зернистостью 160/125. В единичном производстве грубое шлифование твердых кристаллов выполняют свободным абразивом (карбид кремния, карбид бора). Зернистость свободного абразива № 4–М40. Жидкая фаза суспензии свободного абразива – вода. Грубое шлифование остальных кристаллов выполняют электрокорундовыми порошками зернистостей М40 и М28. Жидкая фаза суспензии – вода. При этом необрабатываемые поверхности

водорастворимых кристаллов предохраняют от разрушения нанесением слоя защитного лака.

Среднее и тонкое шлифование твердых кристаллов выполняют водными суспензиями свободного абразива (алмаз, карбид бора) зернистостей 20/14–3/2, М20–М5. Аналогичное шлифование мягких и водорастворимых кристаллов выполняют микропорошками электрокорунда зернистостей М20–М5. Жидкой фазой суспензии являются насыщенные растворы солей этих кристаллов, спирт, глицерин. Для уменьшения глубины нарушенного слоя и вероятности образования дефектов (царапин, выколок) при шлифовании мягких и водорастворимых кристаллов используют инструмент из стекла, хрупкость которого исключает возможность закрепления зерен абразива.

Тонкое шлифование водорастворимых кристаллов можно заменить безабразивной обработкой – растворением поверхностного слоя, образованного грубым и средним шлифованием. Шлифовальник представляет собой металлический или стеклянный корпус с точной поверхностью, на которую закрепляют тонкую ткань (бязь, батист) и смачивают ее водой. Вода при температуре 30–40 °С, растворяет кристалл. Такой процесс не образует нарушенного слоя, поэтому механическая прочность и термостойкость деталей выше по сравнению с деталями, отшлифованными свободным абразивом. Безабразивная обработка выполняет одновременно функцию предварительного полирования.

14.2.3. Полирование кристаллов

Полирование кристаллов отличается разнообразием применяемых абразивов и материалов полировальника, а также жидкой фазы полирующей суспензии.

При полировании рубина (сапфира) материалом полировальника могут быть металлы – олово, медь, а также кварцевое стекло, агат. Абразивом служат алмазные пасты зернистостью от 2/1 до 0,5/0.

Полирование кварца выполняют с использованием тех же материалов, что и стекла.

Полирование мягких кристаллов (КСI, KI, CsI и др.) разделяют на две стадии – предварительное и окончательное. Задача первой стадии – быстрое удаление нарушенного слоя и придание поверхности изделия формы, близкой к требуемой. Цель второй стадии – уменьшение неровностей полированной поверхности, придание ей необходимой точности и чистоты. Материалом полировальника служит полировочная смола с восковым покрытием, которое, имея малую твердость, способствует повышению чистоты поверхности. Непосредственно на металлический корпус слой воска не наносят, так как у него отсутствует текучесть и полировальник трудно поддается формованию. Для повышения чистоты полируемой поверхности нивелируют уровень зерен, проводя предварительное (до полирования) растирание суспензии, нанесенной на полировальник. В качестве полиру-

ющего материала для мягких кристаллов используют окись хрома. Жидкой фазой полирующей суспензии служат вода, глицерин и их смеси.

При полировании мягких кристаллов поверхность полировальника не подрезают, а периодически корректируют стеклянной пластиной, точность формы поверхности которой соответствует точности готовой детали. При высоких требованиях к точности деталей их доводят в сепараторах. Форму поверхностей контролируют интерференционным бесконтактным способом.

При полировании водорастворимых и гигроскопичных кристаллов процесс ведут досуха, после чего поверхность водой не промывают, так как вследствие растворения могут быть вскрыты царапины и точки, образовавшиеся при шлифовании. Работу выполняют в резиновых перчатках или напальчниках, поскольку при касании пальцами полированных поверхностей последние могут помутнеть. Заготовки хранят в эксикаторах с прокаленным и обезвоженным хлористым кальцием. Полированные детали подвергают вакуумной сушке для удаления поверхностной влаги, затем прогревают в термостате для повышения предела прочности кристалла и защищают полированные поверхности.

Для получения высокого класса чистоты полированных поверхностей некоторых кристаллов в суспензию вводят вещества, действие которых сочетает окисление поверхности с одновременным ее растворением (химико-механическое полирование). При этом улучшается чистота полируемой поверхности, повышается интенсивность процесса и уменьшается толщина нарушенного слоя. Этот слой оказывает влияние не только на свойства самого кристалла, но и на свойства эпитаксиальных пленок. В частности, плотность дислокаций в пленках будет такой же, как и в поверхностном слое кристалла. Скопление дислокаций приводит к неравномерному проникновению диффундирующего вещества и к искажению фронта $p-n$ -перехода.

14.3. Изготовление оптических деталей из некоторых кристаллов

14.3.1. Поляризационные призмы из кальцита

Призмы из кальцита (CaCO_3) разделяют на одно- и двухлучевые. Первые дают один пучок линейно поляризованного света, распространяющегося в направлении, совпадающем с падающим на входную грань. Вторые образуют два пучка линейно поляризованного света, причем один из них или оба распространяются под углом к падающему пучку.

На рис. 14.2 показаны однолучевые призмы Глана (рис. 14.2, *а*), Глана–Томпсона (рис. 14.2, *б*) и Аренса (рис. 14.2, *в*). Призма Глана состоит из двух частей, разделенных воздушным промежутком толщиной $0,05 \pm 0,01$ мм, который создают прокладкой из алюминиевой фольги.

Двухлучевые призмы Сенармона (рис. 14.2, *г*), Волластона (рис. 14.2, *д*) и Рошона (рис. 14.2, *е*) состоят из двух частей, склеенных между собой.

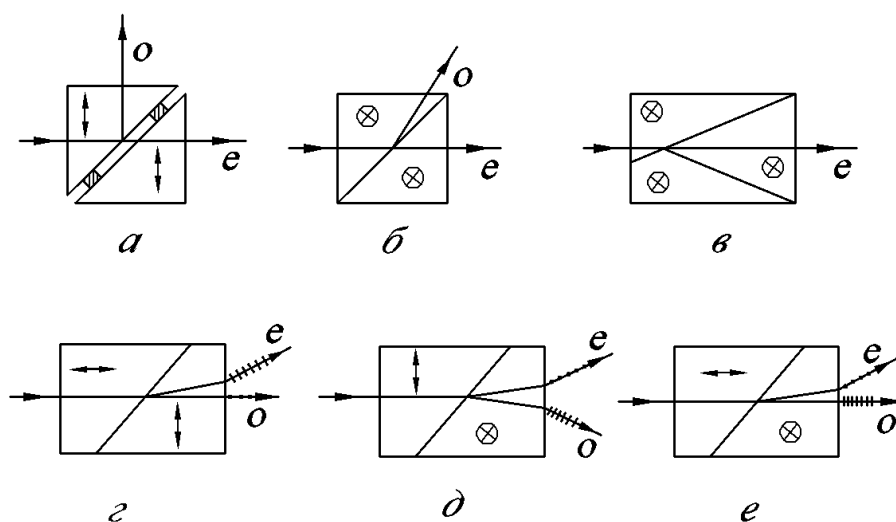


Рис. 14.2. Типы поляризационных призм из кальцита

Эти призмы различаются расположением оптических осей в соединяемых между собой частях.

Для изготовления призм последовательно выполняют следующие операции:

- исходный кристалл-полуфабрикат раскалывают по плоскостям спайности на ромбоэдры, соответствующие типу и размеру призм;
- шлифованием создают две базовые плоскости, перпендикулярные оптической оси кристалла, т. е. ориентируют кристалл;
- на ориентированной пластинке с учетом требуемого положения оптической оси намечают контуры будущей призм и пластинку распиливают на заготовки;
- заготовки соединяют в столбик или устанавливают на приспособления, аналогичные используемым при изготовлении призм из стекла, и обрабатывают.

14.3.2. Линзы, призмы и пластинки из кварца

При использовании кварца для изготовления линз и призм необходимо исключить свойственные ему двойное лучепреломление и вращение плоскости поляризации. При изготовлении линз это требование выполняют, совмещая оптическую ось детали с оптической осью кристалла. Исходной заготовкой линзы служит плоскопараллельная пластинка, у которой преломляющие поверхности перпендикулярны оптической оси кристалла. Пластинку округливают до диаметра, заданного чертежом линзы. На одну из поверхностей наносят сферу заданного радиуса. Необрабатываемая поверхность пластинки выполняет функцию измерительной базы, по отношению к которой и ориентируют положение сферы, контролируя разнотолщинность по краю. Эта погрешность должна быть минимальной, так как при обработке второй поверхности роль измерительной базы выполняет первая.

Диспергирующие 60-градусные призмы представляют собой сборку, состоящую из двух призм с углом 30° , одна из которых изготовлена из правовращающего, а другая – из левовращающего кварца. Между собой их соединяют действием сил молекулярного сцепления.

Из кусков право- и левовращающего кварца выпиливают заготовки в виде параллелепипедов, у которых сначала полностью (включая полирование) обрабатывают две плоскости, параллельные одна другой и ориентированные перпендикулярно оптической оси кристалла. По отношению к ним обрабатывают, ограничиваясь шлифованием, остальные грани. Распилив параллелепипед по диагонали, получают две заготовки призм. Используя в качестве измерительной базы полированную и точно ориентированную по отношению к оптической оси плоскость (большой катет призмы), обрабатывают гипотенузную и малую катетную грани. Изготовленные из право- и левовращающего кварца 30-градусные призмы комплектуют с учетом знака и величины отступления от плоскостности поверхностей, по которым они должны быть соединены. После чистки поверхности соединяют, получая 60-градусную призму. Возможные деформации поверхностей и неоднородности материала вызывают необходимость коррекции волнового фронта путем ретуши (локального полирования) гипотенузной грани.

Из кристаллического кварца изготавливают также пластинки с разностью хода $\lambda/4$, $\lambda/2$ и λ . Толщина таких пластинок рассчитывается по формуле

$$t = \frac{1}{n_o - n_e} \frac{\lambda}{k},$$

где λ – длина волны света;

n_o и n_e – показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей;

k – коэффициент, учитывающий заданную разность хода ($k = 4; 2; 1$).

Технология изготовления пластинок сводится к выполнению следующих операций:

1. Изготавливают плоскопараллельную пластинку толщиной 2–2,5 мм с поверхностями, ориентированными параллельно оптической оси кристалла.

2. Полностью обрабатывают первую поверхность, полированием удаляя трещиноватый слой.

3. Заготовки соединяют с приспособлением действием сил молекулярного сцепления и микропорошками М20, М10 шлифуют вторую поверхность. При этом толщину заготовок уменьшают до 0,3–0,4 мм.

4. Полированием пластинки доводят до толщины, определяемой заданной разностью хода.

Глава 15. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СТЕКЛОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

15.1. Характеристика деталей

В ряде устройств применяют оптические зеркала, которые в процессе эксплуатации подвергаются воздействию значительных динамических нагрузок, поэтому конструкция таких деталей должна сочетать высокие оптические свойства отражающих поверхностей с достаточной прочностью материала.

Первому условию удовлетворяют такие традиционные оптические материалы, как оптическое и кварцевое стекло, ситаллы. Однако вследствие малой прочности эти материалы не выдерживают необходимых нагрузок и разрушаются.

Второму условию отвечают металлы, но из-за большой пористости, неоднородности и других свойств металлов получение на них оптических поверхностей высокого качества в настоящее время невозможно.

Кроме того, оптические зеркала из стекла имеют большую массу, а также не обеспечивают высокой стабильности формы отражающей поверхности при перепаде температуры окружающей среды и других изменениях условий работы. Большую массу и габаритные размеры имеют также и оправы зеркал. Таким образом, узлы зеркал в оправках представляют собой достаточно материалоемкие конструкции.

Большое различие в температурном коэффициенте линейного расширения стеклянного зеркала и металлической оправы требует применения температурных компенсаторов, что приводит к дополнительному увеличению габаритных размеров и массы приборов.

Наиболее полно отвечают предъявляемым требованиям стеклометаллические зеркала, которые позволяют снизить массу узла в три–четыре раза.

15.2. Конструкция стеклометаллических зеркал

Основание детали изготавливают из металла в виде плоского (рис. 15.1, *a*), сферического или асферического (рис. 15.1, *б*) зеркала или другой формы, обусловленной ее функциональным назначением, а также удобством сборки, юстировки и закрепления.

Для снижения массы при сохранении жесткости конструкции предусматривают глухие облегчающие ячейки в форме треугольников, цилиндров и других фигур. Рабочей поверхностью детали является тонкий слой стекла ($t = 0,2\text{--}0,3$ мм), нанесенный методом спекания.

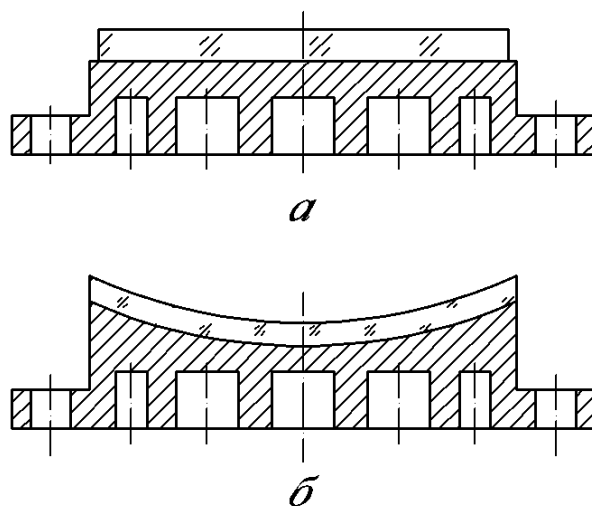


Рис. 15.1. Типы стеклометаллических зеркал

15.3. Материалы для стеклометаллических зеркал и физическая сущность процесса спекания

В качестве материала основания зеркал наиболее часто применяют титановые сплавы, которые, имея относительно низкую плотность, высокую прочность и малый коэффициент линейного расширения, хорошо спекаются со стеклом. Кроме того, применяют также сплавы алюминия, бериллия и нержавеющей стали. В качестве напекаемого слоя используют оптические стекла К8, ЖЗС18 и др.

При разнице коэффициентов линейного расширения стекла и металла не более $1 \cdot 10^{-7}$ образуется соединение, внутренние напряжения которого практически не оказывают заметного влияния на технологию дальнейшей обработки и эксплуатационные свойства детали; при разнице $(1-5) \cdot 10^{-7}$ можно получить изделие удовлетворительного качества, при разнице $(6-10) \cdot 10^{-7}$ возникают критические напряжения.

Соотношение температурных коэффициентов линейного расширения стекла и металла должно быть $\alpha_{ст} < \alpha_{мет}$, тогда в условиях эксплуатации при низких температурах слой стекла испытывает усилия сжатия, что обеспечивает высокую прочность детали.

На поверхности раздела двух фаз (жидкость и ее насыщенный пар, две не вполне смешивающиеся жидкости, жидкость и твердое тело) в результате различных сил межмолекулярного взаимодействия в соприкасающихся фазах появляется направленная внутрь одной из них равнодействующая сил, приложенных к поверхностному слою второй фазы. В частности, на поверхности раздела «жидкость–твердое тело» эта сила направлена внутрь последнего.

Учитывая отмеченное, для спекания разнородных твердых тел необходимо наличие промежуточного слоя, силы межмолекулярного взаимодействия в котором меньше, чем у спекаемых тел. В случае спекания металла со стеклом таким промежуточным слоем является поверхностный

слой металлического основания, насыщенный оксидами металла. Эти оксиды образуются в результате взаимодействия ионов металла с кислородом при повышенных температурах.

15.4. Технология изготовления стеклометаллических зеркал

Технология изготовления стеклометаллических зеркал состоит из предварительных и основных операций обработки как металлического основания зеркала, так и заготовки стеклянной пластины. При изготовлении основания зеркала первая операция – механическая обработка, при которой обеспечивают шероховатость поверхности, спекаемой со стеклом, не грубее 5-го класса, так как чистка более грубых поверхностей затруднительна. Вторая – нормализующий отжиг для снятия внутренних напряжений, возникших после механической обработки.

При обработке стеклянной пластины первая операция – грубое и среднее шлифование рабочих поверхностей до толщины 2–3 мм и боковых поверхностей с выдерживанием тех же габаритных размеров, что и у основания зеркала. Вторая – тонкое шлифование и полирование обеих рабочих плоскостей до шероховатости не грубее 13-го класса. После обработки контролируют свили и пузыри в проходящем свете. Точность формы и чистоту не нормируют.

Дальнейшее изготовление стеклометаллического зеркала включает следующие операции:

- 1) чистку и обезжиривание спекаемых поверхностей;
- 2) нагревание в электрической печи металлической и стеклянной заготовок в сопряженном состоянии до требуемой температуры спекания, выдерживание при этой температуре и охлаждение вместе с печью;
- 3) предварительное шлифование сборки до толщины слоя стекла 0,5–0,6 мм при шероховатости поверхности не грубее 5-го класса;
- 4) термоциклическую обработку сборки с целью стабилизации ее размеров и снятия остаточных напряжений в слое «стекло–металл». Эта операция состоит из трех приемов попеременного нагрева и охлаждения. Затем проводят стабилизирующее старение посредством выдерживания при заданной температуре и охлаждения на воздухе;
- 5) окончательную обработку посадочных мест под подшипники и других элементов конструкции. Если в процессе эксплуатации зеркало должно подвергаться значительным центробежным нагрузкам, то производят его балансировку;
- 6) тонкое шлифование сборки до толщины слоя стекла 0,2–0,3 мм и его полирование с точностью поверхности $N = 1$ и $\Delta N = 0,3$ и чистотой III класса;
- 7) нанесение отражающего покрытия в вакууме.

Литература к разделу 1

1. Ардамацкий, А. Л. Алмазная обработка оптических деталей / А. Л. Ардамацкий. – Л. : Машиностроение, 1978. – 230 с.
2. Основы проектирования и технологии изготовления абразивного и алмазного инструмента / В. Н. Бакуль [и др.]. – М. : Машиностроение, 1975. – 295 с.
3. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. – М. : Высшая школа, 1963. – 519 с.
4. Бурмистров, Ф. Л. Делительное дело. Аппаратура и технологические процессы изготовления микрометрических шкал и сеток механическим, механико-химическим и механико-фотографическим путем / Ф. Л. Бурмистров. – М.-Л. : Машгиз, 1948. – 321 с.
5. Винокуров, В. М. Исследование процесса полировки стекла / В. М. Винокуров. – Л. : Машиностроение, 1967. – 196 с.
6. Ефремов, А. А. Изготовление и контроль оптических деталей / А. А. Ефремов, Ю. В. Сальников. – М. : Высшая школа, 1983. – 255 с.
7. Заказнов, Н. П. Изготовление асферической оптики / Н. П. Заказнов, В. В. Горелик. – М. : Машиностроение, 1978. – 246 с.
8. Законников, В. П. Основы автоматизации производства оптических деталей / В. П. Законников, Б. Э. Быков, С. К. Штандель. – М. : Машиностроение, 1982. – 168 с.
9. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков. – М. : Машиностроение, 1985. – 368 с.
10. Креопалова, Г. В. Оптические измерения / Г. В. Креопалова, Н. Л. Лазарева, Д. Т. Пуряев. – М. : Машиностроение, 1987. – 254 с.
11. Кривовяз, Л. М. Практика оптической измерительной лаборатории / Л. М. Кривовяз, Д. Т. Пуряев, М. А. Знаменская. – М. : Машиностроение, 1982. – 333 с.
12. Оптический производственный контроль / под ред. Д. Малакары. – М. : Машиностроение, 1985. – 400 с.
13. Покровский, В. Н. Делительные машины / В. Н. Покровский. – М. : Машиностроение, 1984. – 209 с.
14. Пуряев, Д. Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей / Д. Т. Пуряев. – М. : Машиностроение, 1976. – 262 с.
15. Технология оптических деталей / М. Н. Семибратов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1978. – 415 с.
16. Справочник технолога-оптика / под ред. С. М. Кузнецова. – Л. : Машиностроение, 1983. – 414 с.
17. Сулим, А. В. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. – М. : Высшая школа, 1975. – 315 с.
18. Технология СБИС. – М. : Мир, 1986. – 404 с.
19. Федотов, А. И. Технология автоматизированного нанесения штрихов и знаков / А. И. Федотов. – Л. : Машиностроение, 1977. – 302 с.

20. Черняев, В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров / В. Н. Черняев. – М. : Радио и связь, 1987. – 464 с.
21. Запорожский, В. П. Обработка полупроводниковых материалов / В. П. Запорожский, Б. А. Лапшинов. – М. : Высшая школа, 1988. – 184 с.
22. Хансперджер, Р. Интегральная оптика. Теория и технология / Р. Хансперджер. – М. : Мир, 1985. – 379 с.
23. Точицкий Л.И. Оптические технологии микро- и наноэлектроники / Л. И. Точицкий. – Минск : РИВШ, 2010. – 298 с.
24. Кордонский, В. И. Магнитореологическое полирование оптических поверхностей / В. И. Кордонский, С. П. Городкин // Оптический журнал. – 2012. – № 9. – С. 81–95.
25. Marinescu, I. Handbook of Lapping and Polishing / I. Marinescu, E. Uhlmann, Doi. T. // CRC Press. – 2006. 492 p.
26. Booiij, S. M. Fluid jet polishing : doctoral thesis / S. M. Booiij. – Technische Universiteit Delft, 2003. – 168 p.
27. Kordonski, W. Magnetorheological jet finishing technology / W. Kordonski, A. Shorey, M. Tricard // J.Fluid Eng. – 2006. – V. 128.
28. Miao, C. Normal force in magnetorheological finishing / C. Miao [et al.] // Proc. SPIE. – 2009. – V. 7426. – P. 74260 C.
29. Kordonski, W. Material removal in magnetorheological finishing of optics / W. Kordonski, S. Gorodkin // Appl. Opt. – 2011. – V. 50. – P. 1984–1994.
30. Kordonski, W. Magnetorheological measurements with consideration for the internal magnetic field in samples / W. Kordonski, S. Gorodkin // J. Phys. : Conf. Ser. – 2009. – V. 149. – P. 012064.
31. Gertzos, K. CFD analysis of journal bearing hydrodynamic lubrication by Bingham lubricant / K. Gertzos, P. Nikolaropoulos, C. Papadopoulos // Tribol. Int. – 2008. – V. 41. – P. 1190–1204.
32. Coor, L. M. Chemical processes in glass polishing / L. M. Coor // J. Non-Cryst. Solids. – 1990. – V. 120. – P. 152–171.
33. Филонов, И. П. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов / И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович, А. С. Козерук. – Минск : ДизайнПРО, 1995. – 208 с.
34. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ, 1997. – 176 с.
35. Способ блокировки линз: пат. 7185 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/005 / А. С. Козерук; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20010237; заявл. 13.03.2001; опубл. 30.09.2002 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2002. – № 2. – С. 130.
36. Устройство для крепления заготовок линз: пат. 8054 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/005 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, К. К. Василенок; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20021057; заявл. 19.12.2002; опубл. 30.06.2004 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 1. – С. 150.

37. Приспособление для блокировки линз: пат. 6563 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/005 / А. С. Козерук; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20010366; заявл. 18.04.2001; опубл. 30.09.2004 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 5. – С. 125.

38. Способ получения инструмента в виде шарового сегмента для наклейки линз жестким способом: пат. 8030 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00, 13/005 / А. С. Козерук; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20030241; заявл. 18.03.2003; опубл. 30.09.2004 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 2. – С. 130.

39. Способ получения шаровидного наклеечного инструмента: пат. 8241 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/005 / А. С. Козерук; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20030649; заявл. 26.06.2003; опубл. 30.12.2004 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 4. – С. 170.

40. Способ крепления линзы с тонким центром: пат. 12997 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/005 / А. С. Козерук, В. Ф. Климович, А. А. Сухоцкий, М. В. Зайцев, Е. С. Таболина; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20071534; заявл. 13.12.2007; опубл. 30.08.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 3. – С. 200.

41. Инструмент для закрепления линз в виде отрицательного мениска при двусторонней обработке: пат. 13577 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/005 / А. С. Козерук, В. Ф. Климович, В. О. Кузнечик, Е. П. Каролик, А. П. Камлюк; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20080506; заявл. 18.04.2008; опубл. 30.12.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 2. – С. 130.

42. Способ управления процессом формообразования прецизионных поверхностей: пат. 5650 Респ. Беларусь, МПК В 24В 1/00 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а19980173; заявл. 24.02.98; опубл. 30.12.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 5. – С. 173.

43. Способ одновременной двусторонней обработки деталей со сферическими поверхностями: пат. 7911 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 / А. С. Козерук, И. П. Филонов; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20030242; заявл. 2003.03.18; опубл. 2006.04.30 // Офиц. бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 2. – С. 158.

44. Способ групповой обработки деталей с выпуклыми сферическими поверхностями: пат. 8031 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, К. К. Василенок; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20030314; заявл. 10.04.2003; опубл. 30.12.2004 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 1. – С. 250.

45. Способ доводки сферических поверхностей: пат. 3380 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/02, 11/00 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, Ф. Ф. Климович, Р. В. Федорцев; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а960131; заявл. 21.03.96; опубл. 30.06.2000 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2000. – № 5. – С. 125.

46. Способ центрирования линз: пат. 2411 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/005 / А. С. Козерук, И. П. Филонов; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а277; заявл. 05.05.93; опубл. 30.09.98 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1998. – № 2. – С. 135.

47. Способ обработки шаровидных деталей: пат. 8484 Респ. Беларусь, МПК В 24В 11/02, 13/00 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, М. И. Филонова; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20030650; заявл. 26.06.2003; опубл. 30.12.2004 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2004. – № 4. – С. 178.

48. Станок для одновременной двусторонней обработки линз с кривыми вогнутыми поверхностями: пат. 10726 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, А. А. Сухоцкий, В. Ф. Климович, Е. С. Таболина; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а 20060589; заявл. 2006.06.14; опубл. 2008.06.30 // Офиц. бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 3. – С. 76.

49. Станок для одновременной двусторонней обработки линзы с полыми вогнутыми поверхностями: пат. 10724 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 / А. С. Козерук, В. Ф. Климович, А. А. Сухоцкий; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20060117; заявл. 06.02.2014; опубл. 10.30.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 170.

50. Способ обработки шариков: пат. 2834 Респ. Беларусь, МПК В 24В 11/02 / А.С. Козерук, М.И. Филонова; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а1104; заявл. 29.12.93; опубл. 30.06.99 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1999. – № 3. – С. 178.

51. Инструмент для обработки шариков: пат. 5049 Респ. Беларусь, МПК В 24В 11/02 / А. С. Козерук, М. И. Филонова; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а19981053; заявл. 20.11.98; опубл. 30.03.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 5. – С. 202.

52. Усовершенствованный инструмент для пневмоцентробежной обработки шариков / А.С. Козерук [и др.] // СТИН. – 2000. - № 7. – С. 28–29.

53. Способ обработки сферических поверхностей: пат. 2069 Респ. Беларусь, МПК В 24В 11/02 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, В. И. Чембрович, В. И. Шамкалович, Т. А. Реут; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № 88; заявл. 15.01.93; опубл. 30.03.98 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 1998. – № 2. – С. 98.

54. Инструмент для обработки шариков: пат. 6824 Респ. Беларусь, МПК В 24В 11/02 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, С. П. Басалаев, А. И. Конавалова, А. А. Сухоцкий; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20010466; заявл. 23.05.2001; опубл. 30.03.2005 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 3. – С. 108.

55. Станок для двусторонней обработки плоских поверхностей: пат. 3523 Респ. Беларусь, МПК В 24В 7/17, 37/04 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, Н. В. Кашко, О. Г. Крысин, В. И. Харкевич, В. Ю. Губаревич; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № 960213; заявл. 29.04.96; опубл. 30.09.2000 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2000. – № 5. – С. 302.

Раздел 2

НАНЕСЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ

Глава 16. ФОРМИРОВАНИЕ И СТРУКТУРА ТОНКИХ ПЛЕНОК

16.1. Общие положения

Тонкими пленками в оптике называют покрытия, толщина d которых значительно меньше длины световой волны λ . Их свойства отличаются от свойств тех же материалов в массивных образцах и зависят от толщины пленки и условий ее образования. Отличия обусловлены в основном структурой пленки и материала слоя, а также наличием примесей.

В настоящий момент пленки наносят разнообразными способами, одним из наиболее распространенных среди которых является их напыление в вакууме. В этом случае слой осаждается из паров напыляемого вещества, которые образуют атомарный пучок («струю»). Этот пучок направляется в сторону подложки (покрываемой поверхности) и обдувает ее. Основываясь на результатах исследования слоев, полученных напылением в вакууме разнообразных материалов на нейтральные подложки, и на некоторых общих соображениях, было высказано предположение о существовании двух механизмов конденсации: «пар \rightarrow кристалл» (сокращенно ПК) и «пар \rightarrow жидкость \rightarrow кристалл» (сокращенно ПЖ/К).

Действительно, наблюдения, проведенные с помощью оптического и электронного микроскопов, показали, что зародыши частиц, конденсирующихся на подложке, имеют форму или ограниченных микрокристалликов, или микрокапелек (кластеров), т. е. осаждаемое вещество конденсируется в одном из агрегатных состояний: или кристаллическом, или жидком. Причем жидкое состояние наблюдается на подложках, температура которых значительно ниже температуры плавления напыляемого материала. Кластер остается жидким довольно длительное время, а затем кристаллизуется. При определенной для данного распыляемого вещества температуре один механизм может смениться другим.

Образование зародышей можно объяснить более сильной связью атомов конденсата между собой в пленке по сравнению с их связью с атомами поверхности нейтральной подложки. Поэтому атомы свободно мигрируют по подложке и при достаточно сильном пересыщении такого двумерного пара образуют зародыши кристаллической или жидкой конденсированной фазы. Затем зародыши разрастаются в двух, а позже и в трех измерениях. Если имеет место более сильная связь осаждающихся атомов с подложкой, то реализуется резкое, например эпитаксиальное, влияние подложки на рост пленки по ПК-механизму.

Эксперимент показал, что кристаллические материалы, не относящиеся к типичным металлам и кристаллизующиеся в решетках с малым координационным числом (сурьма, селен, сера, теллур, германий, кремний и многие соединения с ковалентными связями), конденсируются на изолирующих подложках в основном в аморфном состоянии.

На формы роста напыляемой пленки существенное влияние оказывают структура подложки, ее температура, давление остаточных газов в установке, скорость конденсации.

Аморфные подложки, например стекла, на своей поверхности часто имеют нерегулярности. Ими, в частности, могут быть центры рекристаллизации. В результате пленка осаждается неравномерно. Однородную пленку на стекле можно получить, если предварительно напылить слой SiO_2 толщиной 50–500 нм.

Изменяя скорость осаждения или температуру подложки, можно достигнуть критического пресыщения, обуславливающего образование зародышей новой фазы. Для данной плотности атомарного потока существует предельная температура подложки (и наоборот), при которой концентрация адсорбированных атомов может достичь критической величины. Осаждение при более высоких температурах подложки не приведет к образованию конденсированной пленки.

16.2. Металлические покрытия

Процесс формирования металлического покрытия можно разделить на несколько стадий. Первоначально на поверхности подложки конденсируются изолированные друг от друга атомы, которые образуют нечто вроде двумерного газа. Затем возникает двумерный коллоид, т. е. изолированные друг от друга гранулы металла. По мере осаждения материала размеры гранул растут. Когда толщина слоя достигает вполне определенной величины, называемой критической, гранулы приходят в соприкосновение друг с другом и начинается процесс их слияния. Слой приобретает рыхлую ячеистую структуру, которая соответствует двумерному гелю, причем слой обладает довольно высокой подвижностью, во многом аналогичной жидкой фазе. Почти одновременно со слиянием гранул начинается процесс отложения следующих ярусов, т. е. двумерный гель преобразуется в трехмерный. При этом структура покрытия уплотняется и начинается последняя стадия формирования металлической пленки – образование сплошного слоя. По мере роста толщины слой приобретает свойства массивного образца.

Прочность связи различных металлических слоев со стеклянной подложкой различна. Например, благородные металлы образуют пленки с низкой адгезией и легко отлущиваются. В то же время химически активные металлы, такие как Cr, Al, насыщают свободные поверхностные связи подложки и образуют прочные покрытия на стекле.

При осаждении металла на металл образуется сплав напыляемого слоя с подложкой в зоне поверхности раздела. Процесс протекает особенно отчетливо, если металл с высокой температурой испарения осаждается на металлическую подложку с низкой температурой плавления материала.

Теоретически картина образования металлического слоя на поверхности диэлектрика была рассмотрена разными авторами. Остановимся на теории Я. И. Френкеля.

Поверхность подложки можно рассматривать как некоторую потенциальную поверхность с «впадинами» и «буграми», размеры которых в случае полированных подложек превышают межатомные расстояния. Атомы распыляемого металла, попав в подложку, либо отражаются от нее, либо отдают ей часть кинетической энергии и аккомодируются поверхностью. Вероятность того, что находящийся в газовой фазе атом при соударении с подложкой хотя бы на некоторое время будет удержан ею, называют коэффициентом конденсации β . Он равен отношению числа сконденсировавшихся атомов к общему числу атомов, ударяющихся о поверхность. Часть атомов в силу непрочности межатомных связей через некоторое время десорбируется, т. е. покидает поверхность.

Адсорбированные атомы (А) могут находиться в различном энергетическом состоянии. Если кинетическая энергия атома W_a больше максимальной потенциальной энергии u_{\max} поверхности подложки, то атом с одинаковой степенью вероятности может перемещаться в любом направлении по подложке, т. е. миграция носит изотропный характер, и адсорбированные атомы (адатомы) в этом случае могут рассматриваться как двумерный газ. Если $u_{\min} < W_a < u_{\max}$, то атом будет перемещаться преимущественно вдоль «седловин» потенциальной поверхности, т. е. миграция будет носить анизотропный характер. Если $W_a < u_{\min}$, атом, попавший в потенциальную яму, не сможет из нее выбраться. Однако в результате многократного обмена тепловой энергией с молекулами подложки энергия этого атома может увеличиться настолько, что станет достаточной для преодоления потенциального барьера и атом перескочит в соседнюю яму. Так как края потенциальной ямы различны по высоте, т. е. высота потенциального барьера неодинакова в разных направлениях, то наиболее вероятно, что атом выйдет из ямы в направлении u_{\min} . Таким образом, перескакивая из одной потенциальной ямы в другую, атом будет мигрировать вдоль определенных направлений.

В процессе миграции адатомы могут встретиться с атомами того же сорта и образовать в результате неупругих столкновений двойники (А + А) и тройники (А + А + А). При этом выделяется энергия кристаллизации, и теперь для реиспарения атома, вошедшего в двойник или тройник, требуется гораздо большая энергия активации, нежели для реиспарения одиночного атома. Следовательно, вероятность реиспарения таких атомов падает.

Для образования слоя необходимо, чтобы число адатомов превышало число реиспаренных атомов, которое, в свою очередь, зависит от вероятности встреч мигрирующих по поверхности подложки атомов.

Предположим, что на единице поверхности после установления динамического равновесия между паром и адсорбированной фазой находится n атомов. Количество атомов, ударяющихся о единицу поверхности в единицу времени, обозначим через N . Тогда среднее время жизни τ атома на поверхности подложки будет определяться соотношением

$$\tau = n/N.$$

Если концентрация атомов в потоке равна n' и поток распространяется нормально к поверхности подложки со средней скоростью атомов

$$v_{\text{cp}} = \sqrt{8kT / \pi m},$$

то при условии, что коэффициент прилипания (конденсации) β равен единице, т. е. все столкновения заканчиваются прилипанием, согласно молекулярно-кинетической теории получим

$$N = \frac{1}{4} n' v_{\text{cp}} = n' \sqrt{kT / 2\pi m},$$

где T – температура подложки;
 k – постоянная Больцмана;
 m – масса адсорбированного атома.
 Следовательно,

$$\tau = \frac{n}{n' \sqrt{kT / 2\pi m}}. \quad (16.1)$$

Если предположить, что адатом осциллирует нормально к поверхности подложки с периодом τ_0 около положения равновесия с потенциальной энергией U_0 , то из соотношения фазовых объемов, занимаемых адсорбированными и свободными атомами, можно записать

$$n / n' = \tau_0 \sqrt{kT / 2\pi m} \exp(-U_0 / kT). \quad (16.2)$$

Из сопоставления соотношений (6.1) и (6.2) получим

$$\tau = \tau_0 \exp(-U_0 / kT).$$

При образовании двойника (A + A) потенциальная энергия каждого из атомов изменяется на величину ΔU_0 , что приводит к изменению его времени жизни на подложке. Тогда

$$\tau' = \tau_0 \exp[-(U_0 + \Delta U_0) / kT] = \tau \exp(-\Delta U_0 / kT).$$

Если на подложке образуется более крупная гранула, содержащая m' взаимодействующих атомов, то изменение потенциальной энергии составит $(m' - 1)\Delta U_0$, где $(m' - 1)$ – число соседей. Это приведет к дальнейшему увеличению времени жизни на поверхности подложки каждого из составляющих гранулу атомов. В случае одноатомного слоя $m' \leq 6$.

Если площадь S поверхности подложки, на которую осаждается слой, значительно превышает размеры площадки S_0 , где проявляется активное действие адатома, т. е. $S \gg S_0$, то эффективная площадь S'_0 , занимаемая парой эффективно взаимодействующих атомов (двойником), будет задаваться соотношением

$$S'_0 = S_0 \exp(-\Delta U_0 / kT).$$

Предположим, что общее число атомов на подложке, образующих рассматриваемый слой, значительно меньше максимального числа атомов, которые могут разместиться на площади S . Тогда можно считать, что на подложке будут находиться только одиночные атомы и двойники. В этом случае уравнение баланса частиц (атомов) на единице поверхности подложки будет иметь вид

$$dn = (N - \alpha(n - n_1) - \alpha'n_1)dt$$

или

$$dn / dt = N - \alpha(n - n_1) - \alpha'n_1, \quad (16.3)$$

где $\alpha(n - n_1) + \alpha'n_1$ – число атомов одиночников и двойников, покидающих единицу поверхности в единицу времени;

α – вероятность десорбции изолированного атома с поверхности подложки, т. е. $\alpha = 1 / \tau$;

$\alpha' = 1 / \tau'$ – вероятность десорбции атома, входящего в состав двойника;

n_1 – число двойников, которое, как легко показать, описывается выражением

$$n_1 \approx n(n - 1)S'_0 / S = n^2 S'_0 / S. \quad (16.4)$$

Приближенный характер равенства (16.4) связан с тем, что некоторые эффективные площадки S'_0 могут перекрываться. Ошибка тем меньше, чем меньше n .

Учитывая (16.4), соотношение (16.3) можно переписать в виде

$$dn / dt = N - \alpha n + \psi n_2,$$

где $\psi = (\alpha + \alpha')S'_0 / S > 0$.

При стационарном режиме $\frac{dn}{dt} = 0$ и для плотности адатомов на поверхности подложки получим

$$n = (\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4\psi N}) / 2\psi. \quad (16.5)$$

Выражение (16.5) справедливо для стационарного процесса до тех пор, пока $\alpha^2 \geq 4\psi N$, т. е. пока $N \leq \alpha^2 / 4\psi$. В этом случае число адатомов не изменяется ($dn / dt = 0$). Очевидно, что предельное значение концентрации адатомов $n_{\text{кр}} = \alpha / 2\psi$. Для того чтобы на подложке начала расти пленка, необходимо, чтобы

$$N > N_{\text{кр}} = \alpha^2 / 4\psi.$$

Тогда корни в выражении (16.5) становятся мнимыми, а скорость роста концентрации адатомов на подложке dn / dt – большей нуля, т. е. начинается рост слоя.

Таким образом, должна существовать некоторая критическая плотность атомов $n'_{\text{кр}}$ в облучающем подложку потоке, при превышении которой начинается рост слоя на подложке. Как показывают теория и эксперимент, величина критической плотности зависит от природы осаждаемого материала, природы подложки, качества ее обработки, чистоты и температуры, угла падения атомарного пучка на поверхность подложки, скорости атомов в пучке. От перечисленных факторов зависит не только ход процесса формирования слоя, но и его структура.

Поскольку S_0 , а значит и ψ зависят от температуры, то из теории Френкеля, кроме того, вытекает, что должна существовать критическая температура $T_{\text{кр}}$, при которой

$$N_{\text{кр}} = \alpha^2 / 4\psi.$$

Если температура подложки выше $T_{\text{кр}}$, то отложения слоя при данной плотности атомарного пучка не происходит. По современным представлениям, простой связи между критической температурой конденсации и критической плотностью пучка $n'_{\text{кр}}$ не существует.

Исследования, проведенные с помощью электронного микроскопа, подтвердили существование критической плотности пучка. Было замечено, что зародыши образуются внезапно и сразу приобретают довольно большие размеры (порядка 20 нм) и ориентацию с минимальной потенциальной энергией. Развитию гранулярной структуры способствуют высокие температуры подложки и кипения материала пленки, малая скорость осаждения, слабая сила связи между пленкой и подложкой, высокая поверхностная энергия материала пленки и незначительная поверхностная энергия подложки.

Характер покрытия существенно зависит от напыляемого материала. Для разных металлов поверхностная концентрация центров конденсации, а также первичные размеры гранул различны. Причем на одном и том же участке размеры гранул различаются в несколько раз.

Все металлы по характеру образуемых ими слоев, который, как показал эксперимент, зависит от температуры плавления напыляемого материала, можно разбить на три группы.

В первой группе $T_{пл} > 1900$ °С. Металлы W, Ta, In, Co, Rh, Gl, Si, Mo, V образуют плотные слои с размерами гранул менее 1,5 нм.

Во вторую группу попали металлы, у которых $T_{пл} = 650–1900$ °С. Это Ag, Cu, Au, Ni, Fe, Cr, Al, Mn, Ti, Be, Pb, Sn, Pd, Pt. У этих материалов размеры гранул и расстояния между ними растут по мере уменьшения $T_{пл}$.

В третьей группе $T_{пл} < 650$ °С. Металлы Sb, Bi, Te, Cd, Zn, Mg, Jn, Tl образуют гранулы с более или менее выраженными кристаллическими формами. Замечена тенденция к образованию пластинок, располагающихся параллельно поверхности.

16.3. Эпитаксиальные пленки

При выращивании пленок на монокристаллической подложке зародыши часто осаждаются таким образом, что все они имеют одну и ту же ориентацию решетки, находящуюся в простом отношении к ориентации решетки подложки. Это явление называют ориентированным нарастанием или эпитаксией (от греческих слов «эпи» – на и «такси» – расположение в порядке). Таким образом, *эпитаксия* – это направленный рост пленки вдоль естественного благоприятного направления. Следует заметить, что для зародышеобразования эпитаксия не требуется. Неориентированные пленки вырастают легче.

Стабильные зародыши растут или вследствие поверхностной диффузии и захвата адатомов, или в результате прямого вторжения атомов из паровой фазы. Первый процесс преобладает при малых размерах зародышей, второй – когда они достигают значительной величины и покрывают большую часть поверхности подложки. Скорость роста зависит от формы зародышей. Плоские зародыши растут быстрее, чем такие же по объему трехмерные скопления. Зародыши могут возникать как непосредственно в объ-

еме паровой фазы (гомогенное зарождение), так и на твердой поверхности (гетерогенное зарождение). Подложка значительно снижает энергию образования зародышей и ускоряет зарождение.

Случаи роста конденсатов монослоями весьма редки. Однако это во все не значит, что монослойный рост пленок представляет собой редкое исключение. Свободная энергия гетерогенного зарождения зависит от контактного угла θ (рис. 16.1) между зародышем и подложкой и от поверхностных энергий границ раздела «пленка–подложка», «пленка–пар» и «подложка–пар». Предполагается, что рост пленки начинается с трехмерных островков, если контактный краевой угол $\theta > 0^\circ$.

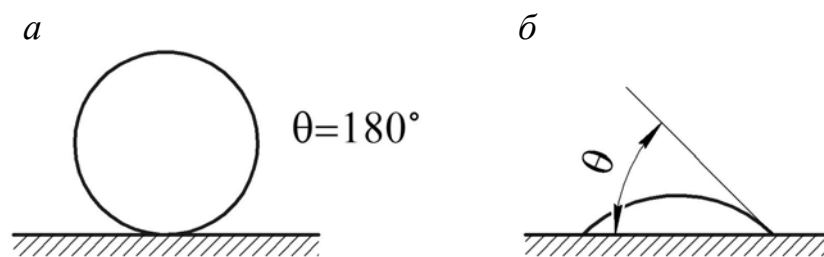


Рис. 16.1. Значения контактного краевого угла θ

Величина угла θ зависит от поверхностных энергий пленки, подложки и границы раздела «пленка–подложка». Для монослойного роста пленки необходимо, чтобы $\theta = 0^\circ$. Это условие выполняется, если поверхностная энергия подложки равна сумме поверхностных энергий пленки и границы раздела «пленка–подложка». Рост монослойных пленок возможен и в некоторых других случаях.

Для каждой пары «материал–подложка» существует температура T_0 , которая определяет упорядоченное расположение адатомов. Если температура подложки ниже T_0 , то адатомы располагаются на поверхности подложки беспорядочно. При температурах, больших T_0 , наблюдается упорядоченное расположение адатомов, образующих двумерный кристалл. Образование скоплений, в которых адатомы располагаются в определенном порядке относительно подложки, способствует возникновению и росту ориентированных зародышей.

Что касается отношения параметров решетки подложки и напыляемого материала, то очевидно, что малое различие параметров решеток благоприятствует эпитаксии. Однако в равной мере справедливо и то, что иногда размеры решеток подложки и эпитаксиальной пленки не совсем подходят друг другу. Встречаются случаи, когда преимущественная ориентация при срастании такова, что совпадение размеров решеток хуже, чем при некоторой другой, в принципе возможной, ориентации.

По-видимому, при эпитаксии поверхностный слой пленки деформируется таким образом, чтобы обеспечить максимальное соответствие с ре-

шеткой подложки. Этого можно достичь двумя путями. Или кристаллы пленки должны быть однородно напряжены, что с энергетической точки зрения маловероятно, или деформации могут компенсироваться некоторым количеством дислокаций, которые расположены в вышележащих (относительно подложки) слоях и снимают рассогласование решеток объемного кристаллита (зародыша, размеры которого больше критического, соответствующего моменту возникновения гранул) и напряженного поверхностного слоя. Вполне возможно, однако, что кристаллиты вовсе не деформированы и имеет место рассогласование между пленкой и подложкой не только в поверхностном слое кристаллита.

Эпитаксиальный рост идет так, чтобы энергия возникающих поверхностей раздела была минимальной. Если граница раздела создается определенными дефектами кристаллического строения, то минимальной должна быть энергия совокупности этих дефектов.

Перечислим основные виды эпитаксии.

Когерентная эпитаксия – атомы подложки и пленки сопрягаются совершенным образом. Обычно кристаллические структуры пленки и подложки одинаковы, но возможно также и срастание граней различных структур.

Эксперимент показывает, что при малом различии параметров кристаллических решеток подложки и эпитаксиального кристалла начальная стадия роста эпитаксиального слоя может протекать путем образования в подложке псевдомолекулярного слоя, который регулярно сопрягается с подложкой путем упругого деформирования.

Полукогерентная эпитаксия – две решетки срастаются лишь по отдельным участкам, причем на этих участках возникают дислокации несоответствия.

Дислокации несоответствия – это искажения правильности структуры типа обрыва или сдвига атомных слоев, а также нарушение правильности их чередования в решетке вдоль линии (рис. 16.2).

Поперечные размеры искажения не превышают одного или нескольких межатомных расстояний, а длина может достигать размера кристалла. Такие дислокации располагаются через правильные интервалы, определяемые величиной несоответствия и силами связи на поверхности раздела, упругими константами нарастания, а также толщиной осажденного слоя.

Ориентированное нарастание – пленка монокристаллическая. Ее решетка ориентирована к подложке определенным образом, но подложка может быть даже аморфной, например стекло, или поликристаллической.

Одномерная эпитаксия – какая-либо грань монокристаллической пленки ориентирована параллельно подложке, но отдельные участки ее разориентированы. При этом может быть несколько фиксированных ориентаций.

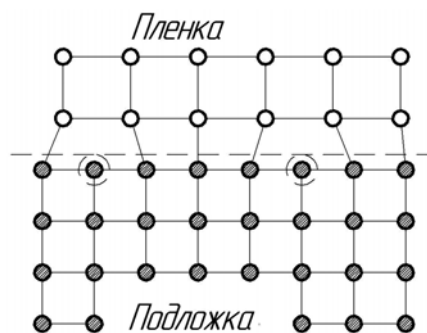
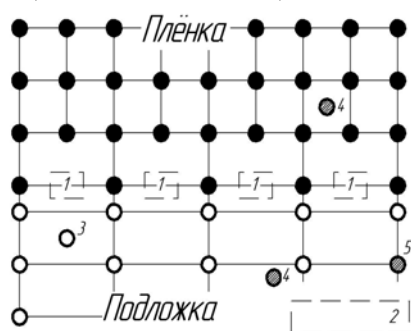


Рис. 16.2. Искажение правильности структуры решетки

В создании эпитаксиальных границ могут участвовать самые разнообразные дефекты кристаллического строения. В процессе роста эпитаксиального слоя виды эпитаксии могут непрерывно изменяться. Одна разновидность может переходить в другую. В условиях вакуумного напыления на монокристаллическую подложку наиболее вероятна следующая последовательность изменения видов эпитаксии: вначале возникает когерентная эпитаксия с компенсацией несоответствия посредством упругих деформаций; по мере роста толщины пленки эта эпитаксия может перейти в эпитаксию с компенсацией несоответствия точечными дефектами.

Точечный дефект – это нарушение кристаллической структуры, размеры которого во всех трех измерениях сравнимы с одним или несколькими (малым числом) межатомными расстояниями (рис. 16.3). Точечными



дефектами могут быть вакансии 1, 2, внедрения 3, 4, т. е. атомы, располагающиеся в междоузлии (3 – собственный атом, 4 – примесный атом), и замещения 5. Таким образом, точечный дефект может изменить период решетки в объеме, ограниченном несколькими межатомными расстояниями. Точечные дефекты могут двигаться через

Рис. 16.3. Виды точечных дефектов кристалл, взаимодействовать друг с другом и с другими дефектами.

Вышеотмеченная последовательность изменения видов эпитаксии может нарушаться. Например, если зарождение происходит на точечных дефектах, то эпитаксия сразу может начаться со стадии компенсации несоответствия точечными дефектами.

Эксперимент показал, что зародыши образуются преимущественно на дефектных участках кристаллических граней. В случае выращивания эпитаксиальных пленок на ионных кристаллах зарождение происходит преимущественно на точечных дефектах, имеющих заряд, или их скоплениях. Этот факт имеет важное значение для разработки способов улучшения условий эпитаксиального роста, которые основаны на том, что путем различных физических воздействий регулируется дефектная структура кристаллической подложки. К числу таких воздействий относятся бомбардировка электронных кристаллов электронами, рентгенезация, насыщение примесями и т. д.

16.4. Процессы старения

Тонкие пленки, полученные распылением веществ в вакууме, чаще всего кристаллизуются на подложках, температура которых значительно ниже температуры плавления испаряемого материала. В связи с этим их кристаллизация протекает в условиях значительного переохлаждения и перенасыщения. По этой причине в пленках возникает большое число разно-

образных дефектов кристаллической решетки: точечные, дислокации, поверхностные (межфазные и межзеренные, дефекты упаковки и др.), объемные (поры, включения и др.). Тонкие пленки, таким образом, находятся в неустойчивом термодинамически неравновесном состоянии. Они обладают повышенной свободной энергией и стремятся самопроизвольно перейти в более равновесное состояние с меньшей свободной энергией. Поэтому при нагревании и даже в процессе длительного хранения при комнатной температуре происходит изменение структуры тонких пленок, перераспределение дефектов кристаллической решетки, уменьшение их концентрации, что в конечном счете приводит к изменению физических свойств покрытий, т. е. к их «старению».

О существовании процессов старения свидетельствует зависимость структуры покрытий от скорости напыления. Для своего развития процесс формирования покрытия требует отрезков времени, длящихся от долей часов до нескольких лет.

Процессы старения можно разделить: 1) на фазовые, структурные и субструктурные и 2) полевые, т. е. происходящие под воздействием магнитного и электрического полей, а также поля механических напряжений и т. д.

К фазовому старению относятся медленные фазовые превращения: кристаллизация, расстекловывание, распад пересыщенного жидкого или твердого раствора, медленное окисление пленок и др. Явления структурного и субструктурного старения охватывают рекристаллизацию, релаксацию макро- и микронапряжений, явления возврата (отдых и полигонизацию), различные процессы изменения субструктуры пленок (изменения дисперсности и углов разориентировки блоков, плотности дислокаций, концентрации избыточных вакансий, дефектов упаковки и др.).

Большое влияние на старение пленок оказывают их толщина, температура окружающей среды и т. д. Процессы старения можно затормозить или даже остановить глубоким переохлаждением. В то же время отжиг (нагревание) ведет к ускорению, а порой и к видоизменению старения.

Необходимо различать влияние температуры T подложки на процесс осаждения слоя и влияние последующей термообработки готового покрытия на его структуру и свойства. В первом случае от T зависят условия аккомодации, десорбции и миграции молекул, величина поверхностных сил, определяющая процесс осаждения слоя и критическую плотность $n'_{кр}$ паров распыляемого материала. Все это сказывается на структуре растущей пленки. Во втором случае пленка уже сформирована но, как отмечалось выше, структура ее неравновесна. Рост температуры приводит к форсированному преобразованию структуры в результате диффузионных процессов. Однако в обоих случаях повышение температуры вовсе не ведет к более равномерному распределению материала по поверхности. Наоборот, неоднородность распределения возрастает. Так прогрев пленок Al до 200–300 °C приводит к росту размеров гранул с ростом толщины плен-

ки, а не к образованию сплошного слоя, т. е. процесс аналогичен процессу роста крупных капель тумана за счет испарения капель меньшего размера.

16.5. Образование пор в конденсированных пленках

16.5.1. Механизмы образования пор

Тонкие пленки, нанесенные распылением веществ в вакууме на кристаллическую или аморфную подложку, представляют собой или направленное нарастание (эпитаксию), или скопление шаровидных кристаллитов. Если скрытая теплота испарения \mathcal{L} атома или молекулы наносимого материала с поверхности подложки больше скрытой теплоты испарения \mathcal{L}' этого атома или молекулы с поверхности скопления таких же атомов или молекул, то на подложке будет расти монослой. Если $\mathcal{L}' > \mathcal{L}$, будут образовываться кристаллиты. Для большинства материалов $\mathcal{L}' > \mathcal{L}$, в связи с этим пленки чаще имеют агломератную структуру, изобилующую разнообразными дефектами. Типичными для пленок дефектами являются субмикро-, микро- и макропоры. Субмикропоры по своим размерам значительно меньше элементов структуры и поэтому могут располагаться внутри них или на границах, но они больше атомных или молекулярных размеров. Микропоры соизмеримы с элементами структуры. Макропоры по своим размерам значительно больше элементов структуры.

Пористость, возникающую в слоях, делят на следующие типы:

конденсационная пористость, образующаяся в процессе кристаллизации веществ, т. е. связанная с формированием конденсированного состояния;

диффузионная пористость, возникающая в твердой фазе, пересыщенной точечными дефектами вследствие миграции и коалесценции (слияние контактирующих вакансий или гранул) избыточных вакансий;

деформационная пористость, развивающаяся в результате пластической деформации и при термоциклической обработке;

радиационная пористость, вызванная взаимодействием всевозможных ионизирующих излучений с веществом;

эрозионная и термоэрозионная пористость, обусловленная воздействием на вещество агрессивной среды.

Свойства пленок, а также протекание различных физических и физико-химических процессов в них зависят от дисперсности пор. Плотность конденсированных слоев из-за пористости значительно ниже плотности массивных образцов.

Одним из основных механизмов образования пор является диффузионно-вакансионный. При осаждении слоя в условиях сильного переохлаждения (температура подложки T значительно меньше температуры плавления $T_{пл}$ осаждаемого материала) в нем интенсивно замуровываются избыточные вакансии, концентрация которых превосходит термодинамически равновесную. Поскольку система стремится к термодинамическому

равновесию, то в результате выхода вакансий к стокам, например на поверхность, и их коалесценции в устойчивые комплексы, вплоть до образования пор, число избыточных вакансий уменьшается. Система приходит в квазистационарное равновесие. Таким образом, процессы диффузионно-вакансионного порообразования включают в себя стадию зарождения пор и стадию их роста, связанную с существованием в локальных участках покрытия направленных вакансионных потоков.

Другим важным механизмом порообразования является так называемый эффект «затенения». В условиях сильного переохлаждения, что имеет место при нанесении покрытий, подвижность осаждающихся атомов оказывается очень низкой. Это приводит к локальным флуктуациям толщины пленки. Причем степень шероховатости и площадь удельной поверхности конденсата зависят от толщины слоя. Степень шероховатости пленки превышает степень шероховатости монолитного материала. Если степень переохлаждения при конденсации уменьшить (подогреть подложку), что, естественно, вызовет рост миграционной подвижности атомов, то выступы на поверхности растущего слоя будут сглаживаться, а впадины заполнятся. Однако добиться исчезновения микрорельефа, обусловленного шероховатостью подложки и различием скоростей роста разных кристаллографических граней, не удастся. Кроме того, микровыступы быстро растущих кристаллитов будут способствовать экранированию некоторых участков подложки от испарителя (эффект затенения), что приводит к образованию внутренних микропор. Замечено, что рост температуры подложки приводит к уменьшению дисперсности элементов структуры, некоторому сглаживанию рельефа поверхности пленки и, как следствие, к ослаблению эффекта затенения. В то же время увеличение угла падения потока усиливает эффект. Общая пористость значительно повышается. Особенно резко возрастает объемная концентрация субмикропор. Эффект затенения является одним из основных механизмов возникновения пор как в поликристаллических, так и в аморфных слоях. В то же время он оказывается существенным в случае эпитаксиальных пленок.

В случае аморфных пленок сильное влияние на появление как открытых, так и закрытых пор оказывает притяжение между налетающими и осевшими атомами. Траектории движения первых искажаются, что приводит к увеличению нестабильности поверхностных неоднородностей пленки, которые приобретают способность увеличиваться в размерах.

Поры могут образовываться в результате срастания автономно растущих элементов структуры, неплотной их стыковки и сшивки. Этому способствуют направленная кристаллизация, газовыделение, образование на контактирующих поверхностях адсорбированных слоев, которые препятствуют срастанию изолированных осажденных частиц. На монокристаллической подложке на начальных стадиях конденсации при срастании изолированных зародышей может иметь место механизм неплотного срастания

в результате взаимного несоответствия на границах контакта. Таким несоответствием могут быть различная форма кристаллов, их разная ориентация.

Важную роль в образовании кристаллизационных пор играют процессы газовой выделения и газопоглощения, особенно если пленка образуется в результате катодного распыления или газотранспорта. При конденсации пара на подложке возможны реакции с образованием газов, которые, несмотря на откачку, могут оказаться частично замурованными в объеме растущего слоя. Кроме того, если предварительная откачка была недостаточной, то газы, выделяющиеся в результате разогрева внутренних деталей вакуумной камеры, также могут сорбироваться на поверхности растущей пленки, что приведет к увеличению пористости покрытия.

Образование сквозных макропор в тонких аморфных и поликристаллических пленках может быть связано с особенностями и способом испарения. Так, например, испарение монооксида кремния сопровождается микровзрывами, которые приводят к выбросу твердых макрочастиц из испарителя. Эти частицы могут или прилипнуть к адсорбируемому слою, или, если их кинетическая энергия достаточно велика, пробивать пленку и отскакивать от твердой подложки. В результате на участке столкновения остается отверстие, вокруг которого из-за «разбрызгивания» конденсата образуется утолщенная пленка. Вероятность пробивания пленки частицами данной энергии тем больше, чем тоньше пленка. Безусловно, некоторые поры впоследствии могут частично или полностью зарости, но часть из них сохранится. Уменьшения числа сквозных микропор можно добиться с помощью сепарации молекулярного потока по энергиям.

16.5.2. Влияние условий нанесения на характеристики пористости пленок

На характеристики пористости поликристаллических, аморфных и некоторых эпитаксиальных пленок сильное влияние оказывают изменения угла падения молекулярного потока, скорости конденсации, температуры подложки, давления и состава атмосферы остаточных газов в камере, способ испарения.

Направление падения молекулярного потока влияет на ориентировку субмикропор, а также на общую пористость пленки. Возникновение ориентированной пористости в поликристаллических пленках является следствием направленной конденсации и формирования структуры, состоящей из столбчатых кристаллитов и областей когерентного рассеяния, растущих в направлении, близком к направлению падения облучающего потока. Наиболее вероятными местами расположения пор в толстых пленках ($d > 1$ мкм) являются границы между столбчатыми элементами структуры. При исследовании поликристаллических слоев, обладающих неоднородной по толщине структурой, часто выявляются две ориентировки субмикропор, что может быть вызвано вторичными термоактивируемыми

процессами. Если в процессе конденсации изменяется угол падения молекулярного луча, то в пленке наблюдается несколько преимущественных ориентировок субмикропор. Аморфные пленки в отличие от поликристаллических слоев других материалов, полученных при том же соотношении температуры подложки и температуры плавления напыляемого материала, содержат субмикропоры с более совершенной ориентировкой вдоль направления, близкого к направлению молекулярного потока.

По мере утолщения слоев в них преобладают мелкие поры, что может быть вызвано торможением процессов коалесценции субмикропор. Кроме того, рост толщины слоев приводит к уменьшению открытой макропористости, однако это вовсе не значит, что снижается общая пористость.

Увеличение скорости конденсации v_k может привести, с одной стороны, к диспергированию структуры формирующегося слоя, а с другой стороны, – к укрупнению элементов структуры. Увеличение v_k способствует образованию большого числа мелких субмикропор и уменьшению доли крупной и средней фракции. При этом скорость конденсации оказывает влияние не только на общий объем и распределение пор по размерам, но также на их форму и ориентировку. Так, повышение v_k приводит к усилению тенденции образования столбчатых элементов структуры, растущих, как отмечалось, в направлении, близком к направлению падения молекулярного потока осаждаемого материала. Скорость конденсации по-разному влияет на пористость слоев, полученных при низком и высоком вакууме. Это вызвано взаимодействием конденсата с остаточными газами, находящимися в камере, а также с процессами химической и физической адсорбции. В результате взаимодействия миграционная подвижность адатомов падает и создаются благоприятные условия для порообразования. Ослабления этого нежелательного процесса при низком вакууме можно добиться одновременным увеличением скоростей испарения и конденсации. В результате резко снижается объемная концентрация открытых и закрытых пор. При этом степень их дисперсности также растет. В условиях высокого вакуума или в случае испарения материалов, нейтральных к атмосфере остаточных газов, рост v_k приводит к формированию более дисперсной структуры, отличающейся высокой концентрацией структурных несовершенств, в том числе и пор. Это вызвано ростом плотности адатомов, что приводит к увеличению вероятности взаимных столкновений и ограничению миграционной способности адатомов.

Скорость конденсации оказывает влияние на размер кристаллитов аморфных пленок. При этом решающую роль здесь играет температура подложки. При комнатной температуре изменение v_k в пределах 1,0–50 нм/с не сказывается на размерах кристаллитов. С ростом температуры подложки T размеры кристаллитов остаются неизменными до некоторого порогового значения v_k , а затем резко падают. При неизменных v_k и T размер кристаллитов зависит от толщины пленки.

Степень переохлаждения, т. е. отношение T к температуре плавления $T_{пл}$, является регулятором процессов образования пор в пленках. Так, например, повышение T от 30 до 120 °С при нанесении тонких ($d < 90$ нм) алюминиевых пленок приводит к уменьшению, а в более толстых ($d > 100$ нм) – к увеличению числа сквозных макропор. Аналогичная зависимость наблюдалась у медных и никелевых пленок. Кроме того, форма субмикропор, образовавшихся при наклонном падении молекулярного пучка, более чувствительна к T , чем форма субмикропор в пленках, полученных при наклонном падении. Причем с повышением T сокращаются продольные и увеличиваются поперечные размеры субмикропор, что приводит к сокращению степени их неравноосности. Как показывает эксперимент, повышение температуры подложки, оказывает невеликое воздействие на характеристики пористости пленок, полученных при различных углах падения молекулярных пучков и одинаковой скорости конденсации v_k .

Размеры кристаллитов так же изменяются в зависимости от T . Так, диаметр кристаллитов в пленках Ni на кварце или стекле при $v_k = 0,3-1,2$ нм/с составляет 6 нм, если T равна комнатной температуре. Если $T = 350$ °С, то диаметр кристаллитов 100 нм. При этом кристаллиты прорастают на всю толщину пленки. Большие кристаллиты оказываются окруженными переходными областями толщиной в несколько десятков нанометров и шириной около 50 нм. При еще более высоких T диаметр кристаллитов составляет несколько сотен нанометров, а их толщина по всей подложке равна толщине пленки.

На порообразование сильное влияние оказывают тип подложки и состояние ее поверхности (чистота, шероховатость). При плохой очистке поверхности и развитой шероховатости пористость пленок значительно возрастает в основном в результате увеличения сквозной микро- и макропористости.

16.5.3. Влияние термообработки на характеристики пористости

При отжиге поликристаллических пленок в условиях повышенной температуры наблюдается интенсивный рост отдельных зерен в направлении, перпендикулярном поверхности пленки. Причем увеличение толщины крупных зерен сопровождается утоньшением или полным исчезновением соседних мелких зерен. Таким образом пленка из сплошной превращается в пористую. Если отжиг проводится длительное время или при высокой температуре, то пленка вообще распадается на отдельные изолированные островки. Наиболее интенсивно этот процесс наблюдается в пленках Ni и Ag. При отжиге пленок Al отдельные участки зерен растут перпендикулярно поверхности, в результате чего образуются выступы в виде пирамид, бугорков или «усов». Наиболее интенсивно структура изменяется в первые

3–5 минут. Последующие изменения протекают более медленно, причем характер процесса зависит от исходной структуры и условий отжига.

Следует заметить, что в случае аморфных и поликристаллических пленок в местах размещения сильно разориентированных мелких зерен образуются поры диффузионно-вакансионного происхождения. В процессе длительного отжига поверхность этих пор покрывается высокодисперсной оксидной пленкой (Ni, Ag, Al). Поверхностный оксидный слой оказывает влияние на кинетику рекристаллизации слоев.

При длительном пребывании пленок при комнатной температуре в неотожженных пленках образуются сквозные макропоры и бугорки.

Увеличение продолжительности нагрева монокристаллических пленок приводит к уменьшению их субмикропористости.

В результате термоциклической обработки пленок Mg микропористость возрастает, если число циклов достаточно велико (порядка 100). При этом общий объем крупных пор также возрастает. Что касается пленок Al, то их термоциклическая обработка приводит к «залечиванию» сквозных макропор при нагреве и их росту при охлаждении.

16.5.4. Радиационная пористость

Пленки могут использоваться в качестве защитных покрытий для деталей и механизмов, используемых в условиях облучения. Следует различать процесс образования наполненных газом пузырьков в результате облучения делящихся материалов и сложные процессы радиационного порообразования, происходящие в материалах как с участием, так и без участия газообразных продуктов.

Как показал эксперимент, поры радиационного происхождения в массивных образцах образуются в основном внутри зерен на участках, где имеется достаточное число дислокаций. Если плотность дислокаций в необлученном материале мала, то заметному порообразованию предшествует зарождение дислокационных петель и межузельных атомов. Послерadiационный нагрев материалов способствует процессам коалесценции вакансий и развитию микропор. Причем отжиг материалов с радиационными порами сопровождается расширением обедненных порами зон.

Процессы радиационного порообразования в тонких пленках имеют свои особенности по сравнению с массивными образцами. В связи с двумерностью пленок существенно возрастает роль их поверхности как стока для точечных дефектов. При этом важное значение имеют не только толщина пленки, но и тип структурных дефектов, характер их распределения по толщине, дисперсность, форма и ориентировка элементов структуры, наличие на поверхности и на межзеренных границах инородных адсорбированных атомов. Важное значение, кроме того, имеют адгезионные характеристики, уровень и степень изотропности микро- и макронапряжений, степень кристаллографического сопряжения с подложкой. Особенно

сти процесса радиационного порообразования в пленках по сравнению с беспористыми и малопористыми массивными материалами могут быть обусловлены макро-, микро- и субмикропористостью пленок конденсационного происхождения.

В пленках, обладающих высокой степенью дисперсности элементов структуры, процессы порообразования могут подавляться. Кроме того, при наличии высокой степени дислокаций влияние поверхности распространяется на меньшее расстояние. В облученных пленках, так же как и в массивных образцах, образуются газонаполненные субмикропоры (пузырьки).

Для снижения радиационного набухания материалов можно использовать пористые покрытия, которые обладают хорошей сорбционной способностью по отношению к сопутствующим или образующимся при радиационном воздействии газам. Например, пленка Ti толщиной около 0,2 мкм, нанесенная на ниобий, облучаемый ионами Ni , на порядок уменьшает число зарождающихся микропор и значительно снижает их средний размер. Тонкие (до 1,5 мкм) алюминиевые покрытия, благодаря их открытой пористости и столбчатой дисперсной структуре, что в отличие от массивных образцов существенно облегчает выделение из них He , могут применяться для защиты термоядерных реакторов от эрозии первой степени.

Исследования показали, что радиационное воздействие на пленки в процессе их формирования дает возможность направленно изменять характеристики пористости и структуру пленок, а также стабильность этих характеристик.

16.5.5. Влияние пористости на оптические свойства пленок

Наличие пор влияет на прозрачность материалов, их показатель преломления, излучательную способность, характер поглощения и рассеяние света. Причем степень влияния определяется концентрацией, размером и типом пор, их распределением по объему тела. В частности, укрупнение пор при том же их суммарном объеме улучшает прозрачность материала. Например, низкая прозрачность обычной корундовой керамики обусловлена в основном ее высокой пористостью. В то же время практически беспористая поликристаллическая керамика (лукалокс) со структурой металла пропускает свет подобно стеклу.

Показатель преломления n пористых тел ниже показателя преломления беспористого образца того же материала. Кроме того, наличие открытых микро- и субмикропор повышает гигроскопичность материала, что также влияет на величину n . Поскольку оптическая толщина слоя и коэффициент отражения R света этим слоем зависят от n , то эти характеристики также будут функциями пористости слоев. Естественно, что к наличию влаги в капиллярно-пористых пленках особенно чувствительно положение полос поглощения в ИК-области спектра. Длинноволновый сдвиг полосы поглощения увеличивается с ростом пористости покрытия.

λ_{\max} многослойных диэлектрических интерференционных светофильтров вследствие адсорбции влаги в порах может смещаться на величину, превосходящую $\Delta\lambda_{0,5}$. Стабильности оптических характеристик можно достичь в результате герметизации тонкослойных диэлектрических покрытий.

Анизотропия оптических свойств наблюдается у вакуумных покрытий, обладающих высокой объемной концентрацией преимущественно ориентированных пор, окаймляющих растущие в направлении молекулярного потока столбчатые элементы структуры.

Классическая теория следующим образом объясняет влияние изолированных пор на диэлектрическую постоянную материала ϵ , а значит и на n . Предполагается, что локальные изменения ϵ происходят скачкообразно на поверхности каждой поры. В то же время для поглощающей среды наличие пор равнозначно введению дополнительной оптической структуры, «внутренней шероховатости». В результате этого волны, распространяющиеся в сплошных областях, рассеиваются на пористых промежутках, что приводит к изменению ϵ , которая, кроме того, становится комплексной величиной.

Итак, пленки, полученные распылением веществ в вакууме, имеют разнообразные дефекты, начиная от пор различных размеров и формы и кончая разнообразными вакансиями, что существенно сказывается на их свойствах, отличающихся от свойств массивных материалов. Поскольку пористость покрытий можно, как отмечалось, направленно изменять, это дает еще одну возможность получения покрытий с заданными оптическими характеристиками.

16.6. Напряжения в пленках

В тонких пленках, полученных распылением веществ в вакууме, наблюдаются довольно сильные напряжения. Так, например, если пленки использовать в глубоком вакууме, то под действием напряжений, обусловленных наличием микропор, возможно разрушение покрытий. Объясняется это тем, что в таких условиях давление в микропоре может превышать ресурс прочности стенки, и, как результат, произойдет ее прорыв. На отдельных участках будет наблюдаться выпучивание пленки. Если давление еще более понизить, то это может привести к вскрытию более глубоко залегающих микропор.

Разнообразные причины возникновения напряжений в конденсированных слоях можно разделить на пять групп:

- 1) различие температурных коэффициентов линейного расширения пленки и подложки, что особенно важно, поскольку температура эксплуатации покрытия отличается от температуры его изготовления;
- 2) наличие атомов примесей и захваченных атомов газа;
- 3) замораживание дефектов решетки в процессе конденсации;

4) поверхностные эффекты, значение которых из-за малости толщины пленки, когда подвижность дислокаций ограничена, может быть достаточно высоким;

5) образование окислов и других химически связанных с покрытием поверхностных слоев.

Наибольшее количество напряжений чаще всего связано с третьей причиной.

В поликристаллических пленках, где, как отмечалось, имеют место столбчатые элементы структуры, наблюдается анизотропия микронапряжений. Вдоль направления падения молекулярного потока, т. е. вдоль длины кристаллитов, микронапряжения в несколько раз больше, чем в перпендикулярном направлении. В наклонно осажденных конденсатах, уровень напряжений в которых вообще высок, этот эффект проявляется особенно ярко. Возможно, описанная анизотропия обусловлена частичной разгрузкой напряженного состояния кристаллита в направлении, перпендикулярном падающему молекулярному потоку, порами, которые ориентированы вдоль потока. Этому же содействует большая протяженность продольных межкристаллитных границ по сравнению с протяженностью «торцевых границ».

Следует отметить, что напряжения, обусловленные структурным упорядочением, можно частично снять после нанесения слоя отжигом или в процессе изготовления покрытия с более высокой температурой осаждения. Эту температуру подбирают экспериментально, поскольку ее повышение, с другой стороны, приводит к возрастанию напряжений, обусловленных различием термических коэффициентов расширения.

Все рассматривавшиеся напряжения можно разделить на два типа: термические и собственные. Первые обусловлены различием термических коэффициентов расширения пленки и подложки. Вторые – загрязнениями в пленке и неполным структурным упорядочением, возникшим в процессе роста покрытия.

Термические напряжения не обнаруживают аномалий. Их можно рассчитать по разности термических коэффициентов объемного расширения пленки $\alpha_{пл}$ и подложки $\alpha_{п}$. Если подложка достаточно толстая и ее изгибом при изменении температуры можно пренебречь, то, полагая, что пленка жестко связана с подложкой и температура в процессе напыления остается неизменной, можно записать следующее выражение для деформации пленки:

$$\varepsilon_T = (\alpha_{пл} - \alpha_{п})\Delta T.$$

Здесь ΔT – разность температур подложки во время напыления и во время эксплуатации. Напряжение в пленке можно рассчитать, если ε_T умножить на модуль Юнга. Напряжение считают положительным в случае деформации растяжения и отрицательным – в случае сжатия. При практических применениях термические напряжения бывают довольно высокими

и могут иметь разные знаки. Их вклад в общее напряжение зависит от ΔT и материалов пленки и подложки.

Собственные напряжения в значительной степени обусловлены процессом роста пленки, и в первую очередь скоростью конденсации. Эти напряжения зависят также от толщины покрытия и температуры подложки во время его нанесения.

В табл. 16.1 приведены средние значения собственных напряжений в пленках различных материалов. Толщина пленок составляет приблизительно 100 нм. Среднее значение напряжения принято рассчитывать как силу, приходящуюся на единицу ширины пленки, в расчете на единицу толщины.

Таблица 16.1

Средние значения напряжений в пленках

Материал пленки	Материал подложки	Температура подложки, °С	Напряжение, 10^{-8} , Па	Знак напряжения
Ag	Стекло	90	0,75	Растяжение
Au	Кварц	20	2,9	Растяжение
Ni	Стекло	20	5–8	Растяжение
Al	Стекло	20	1	Растяжение

Как следует из табл. 16.1, знак напряжения у приведенных материалов совпадает. Зависимость величины напряжения от материала покрытия не очень велика. Напряжений в пленках не удается обнаружить до тех пор, пока их толщина не достигает нескольких десятков нанометров. Затем напряжения резко возрастают. Пороговое значение толщины d покрытия, при котором возникает напряжение, соответствует такой ее величине, когда начинается срастание растущих зародышей. Эксперимент показывает, что в основном напряжен слой со стороны свободной поверхности. Его толщина – около 1 нм. О существовании напряжений во внешнем слое свидетельствует тот очевидный факт, что пленки, отделенные от подложки, принимают вогнутую форму (скручиваются).

Исследования зависимости напряжений в металлических пленках от температуры показали, что при температуре подложки 150–200 °С обычно имеют место растягивающие напряжения. Рост температуры приводит к уменьшению напряжений. Возможна даже перемена знака, т. е. растяжение сменяется сжатием. Температура, при которой изменяется знак напряжения, у легкоплавких металлов невысока.

На возникающие в пленках напряжения влияет состав атмосферы в камере, в которой изготавливается покрытие.

Внутренние напряжения в металлических пленках зависят от структурного упорядочения. Длительный отжиг пленок приводит к необратимым изменениям: рекристаллизации, уменьшению числа дефектов в решетке. Это вызывает снижение напряжений в пленках.

В диэлектрических покрытиях наблюдаются как сжимающие, так и растягивающие напряжения. Иногда с ростом толщины покрытия знак напряжения изменяется. Так, в пленках ZnS при медленном напылении возникают растягивающие напряжения, которые при толщине около 120 нм переходят в сжимающие. Перемена знака, возможно, обусловлена структурой пленки.

Диэлектрические пленки обнаруживают более сложную зависимость напряжений от условий нанесения покрытия. Так, напряжения в пленках SiO практически не зависят от толщины слоя в интервале толщин 100–600 нм. В то же время в пленках ZnS наблюдается сильная зависимость от d .

Напряжения в пленках SiO практически не зависят от температуры подложки T , в слоях же ZnS с ростом T \bar{F} падает.

Сжимающие напряжения в пленках ZnS с ростом v_H возрастают, в пленках же SiO – падают, причем при малых скоростях нанесения в пленках SiO возможно возникновение растягивающих напряжений.

Кроме того, напряжения в пленках SiO зависят от температуры испарителя и парциальных давлений кислорода и паров воды во время напыления.

Выдержка диэлектрических пленок на воздухе после их напыления может привести к понижению их механической прочности. Особенно это заметно у пленок, полученных при наклонном падении молекулярного пучка на подложку. Возможно изменение знака напряжения, что приводит к появлению волнистости покрытия. Такие изменения наблюдались, например, у пленок SiO. Эффект был обусловлен наличием в воздухе паров воды, поскольку при выдержке пленок в атмосфере азота при нормальном давлении никаких изменений не наблюдалось.

16.7. Измерение механических свойств покрытий

16.7.1. Механическая прочность

Поскольку интерференционные пленки имеют малую толщину, то разграничить определения их твердости и прочности сцепления с подложкой не всегда представляется возможным. В связи с этим упомянутые два понятия зачастую заменяют одним – твердостью. Существует большое число методов определения механической прочности покрытий.

Рассмотрим некоторые из них.

Чаще других применяются испытания устойчивости покрытия к истиранию. Деталь с покрытием закрепляют в патроне. К детали прижимается с известной заданной нагрузкой резиновый наконечник. Патрон приводится во вращение с определенной скоростью и определяется число оборотов, совершенных деталью до изменения интерференционной окраски покрытия (1-й способ) или до образования царапины, т. е. полного истирания пленки (2-й способ). В некоторых вариантах метода пленка подвергается воздействию абразивных материалов, например, MgF₂ и др. Квалифициро-

ванный работник этим методом может получить воспроизводимые результаты. Сравнение результатов различных экспериментаторов затруднено.

Особо прочные покрытия подвергаются пескоструйным испытаниям, когда исследуемая поверхность подвергается воздействию струи стандартных песчинок, падающих с определенной высоты. Затем исследуется отражение от обработанной и не обработанной песчаной струей поверхности. Плохо отражающие поверхности предварительно покрывают слоем алюминия или серебра.

Известен метод определения микротвердости покрытия по изменению величины отпечатка, оставленного алмазной пирамидой после вдавливания ее в покрытие под воздействием определенной нагрузки.

16.7.2. Адгезия

Плоскость соприкосновения двух тел различной структуры называют *адгезионным контактом*. Очевидно, что такой контакт является двумерно протяженным дефектом структуры, ее естественным слабым местом. Поэтому на практике зачастую наблюдается адгезионный тип отрыва или отслаивания.

Под *адгезией* понимают сопротивление нарушению контакта двух разнородных тел.

Рассмотрим природу сил, ответственных за адгезионную связь. Связь между двумя разнородными телами осуществляется или благодаря какой-либо химической реакции между атомами, расположенными на поверхности, или в результате действия ван-дер-ваальсовых сил. Химическая связь более прочна. При прочих равных условиях она обеспечивает значительно большую энергию и силы взаимодействия.

Поверхностные силы, ответственные за адгезионный контакт, в конечном счете определяются химическим строением поверхности контактирующих тел. Заранее нельзя сказать, какая связь – гомеополярная или гетерополярная – в данном случае обеспечит большие силы сцепления. Нужен конкретный анализ. Чаще встречающаяся на практике гетерополярная (ионная) связь, когда реакция проходит по всей границе, приводит к ряду специфических эффектов. В этом случае происходит передача электронов от одного контактирующего тела к другому. На границе раздела возникает двойной электрической слой. Взаимное притяжение слоев усиливает прочность адгезионного контакта и обеспечивает образование наиболее прочного шва.

Реальная картина явления адгезии чрезвычайно сложна. При сцеплении объектов существенную роль играет неоднородность химических свойств поверхности, которая никогда не бывает идеально гладкой.

Таким образом, адгезия пленок к поверхности стекла, кристаллов и других материалов зависит от химической природы подложки, материала покрытия и окончательно сформировавшейся пленки. Большое значение

также имеют метод получения покрытия, температура подложки во время нанесения слоя, температура последующей термообработки, чистота поверхности подложки, давление остаточных газов в камере, состав атмосферы и т. д. При нанесении покрытий из растворов гидролизующих соединений на прочность сцепления влияют также относительная влажность и температура в помещении, где наносится покрытие.

Образованию химических связей пленок с поверхностью стекла при химических методах их получения из растворов или паров способствует наличие у пленкообразующих веществ функциональных групп $-\text{OH}$, $-\text{Cl}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{OC}_2\text{H}_5$ и др.

Состав стекла также влияет на прочность адгезионного контакта. Химические связи легче возникают на поверхности силикатных стекол, которые всегда покрыты тонким измененным слоем, образующимся в результате взаимодействия стекла с парами воды. Состав и глубина (1–6 нм) этого слоя зависят от состава стекла. Образованию измененного слоя способствуют полировка и промывка стекла водой. Слой препятствует разрушению стекла при его дальнейшей обработке и обеспечивает прочный адгезионный контакт с окисными пленками.

Наиболее распространенным методом определения адгезии пленок к подложкам является метод «липкой ленты». К свободной и покрытой пленкой поверхностям подложки приклеивают липкую ленту или металлические блоки, а затем в направлении нормали к подложке измеряют силу, необходимую для отрыва пленки от подложки в расчете на единицу площади. Пленка отрывается полностью или частично.

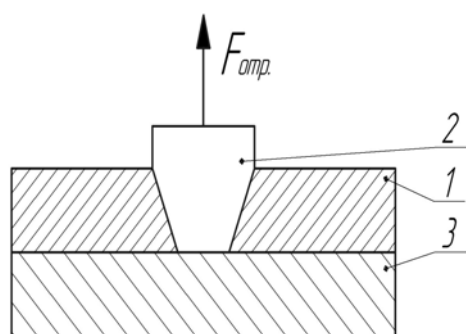


Рис. 16.4. Схема измерения адгезионной прочности покрытия

Адгезионную прочность покрытий измеряют также методом штифтов (рис. 16.4). В матрицу 1 свободно посажен штифт 2. Пленка 3 наносится одновременно на матрицу и торец штифта. При определении адгезии внешняя сила $F_{\text{отр}}$ направлена вверх и вызывает отрыв пленки от торца штифта. Определяемая этим методом адгезионная прочность зависит от толщины покрытия (с увеличением толщины растет), что является особенностью метода.

Кроме того, адгезионную прочность определяют методом царапанья. Зондом на пленку наносят параллельные царапины, расстояние между которыми изменяют до тех пор, пока пленка не начинает отслаиваться.

Используют также методы истирания, центрифугирования (перегрузок), ультразвука и т. д. Данные, полученные разными методами, сравнивать между собой сложно, хотя каждый из них дает удовлетворительные результаты.

16.7.3. Измерение механических напряжений

Как отмечалось ранее, напряжения в пленке делят на собственные и термические. Рассмотрим методы определения собственных напряжений. Отметим, что напряжения называют растягивающими, если подложка изгибается так, что длина пленки уменьшается, и сжимающими, если пленка стремится растянуться.

Методы определения напряжений разнообразны. Их можно определять по прогибу «бутерброда» из пленки и подложки во время или после нанесения слоя. В этих опытах подложка представляет собой длинный и тонкий брусок, один конец которого закреплен (консоль) или оба конца опираются на «ножи». При этом прогиб определяют различными методами: оптическим, механическим, электромеханическим и т. д. Среди отмеченных методов есть достаточно чувствительные, позволяющие определять напряжения на начальных стадиях роста покрытия. Предпочтение следует отдавать тем методам, которые допускают автоматическую регистрацию напряжений. Чувствительность методов можно повысить, используя более тонкие бруски. Серьезным ограничением точности измерений являются пределы применимости уравнений прогиба пластин.

Анизотропию напряжений в пленках можно наблюдать интерференционным методом по прогибу круглой пластины (рис. 16.5).

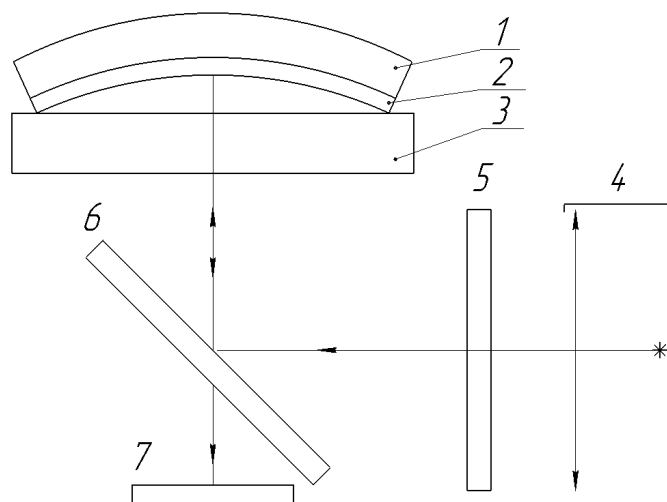


Рис. 16.5. Схема наблюдения анизотропии в пленках

Исследуемая подложка 1 с пленкой 2 помещается на прозрачную массивную стеклянную пластину 3. Свет от осветителя 4 проходит через фильтр 5 и полупрозрачной пластиной 6 направляется на исследуемую деталь. Интерференционная картина наблюдается в отраженном свете в микроскопе 7. Поскольку подложка не может быть идеально гладкой, то полученную картину сравнивают с той, которая наблюдается, когда пленка на подложку еще не нанесена или уже снята.

При выводе формулы для расчета напряжений по методу бруска или пластины предполагалось, что пленка деформирует подложку, которая про-

гибается до равновесного положения, и что сцепление между пленкой и подложкой достаточно сильно и проскальзывание отсутствует. В этом приближении в уравнении отсутствуют упругие постоянные пленки, так как напряжения в покрытии рассчитываются по наблюдаемой деформации подложки.

Расчет напряжений обычно ведут по формуле Стоуни

$$F = Eh^2 / 6rd.$$

Здесь F – напряжение в пленке, E – модуль Юнга подложки, h – толщина подложки, r – радиус кривизны изогнутой полоски, d – толщина пленки. Напряжение можно выразить через прогиб бруска или другого элемента. Приведенная формула не учитывает все детали опыта. Например, не учтено изменение напряжения в пленке в результате изменения кривизны подложки в процессе конденсации и т. д. Однако поправки, которые можно сделать, вносят вклад в результирующую величину в пределах всего лишь около 0,4 %, т. е. пренебрежимо малы.

Существуют и другие осложнения. Так, рассчитываемые напряжения считают однородными по толщине, что, вообще говоря, не соответствует действительности и подтверждается простым часто наблюдаемым фактом закручивания отслоенного покрытия в сторону от подложки. Градиент температуры по подложке во время нанесения покрытия или впоследствии также приводит к изгибу «бутерброда» «пленка–подложка», который ошибочно можно принять за результат собственных напряжений в покрытии.

Напряжения в пленках, кроме того, можно определить рентгенографическими и электронно-графическими методами измерений постоянных решетки пленки и сравнением их с постоянными массивных образцов.

Глава 17. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

17.1. Металлические покрытия

Остановимся на оптических свойствах металлических пленок, используемых на практике. К ним относятся покрытия, которые обладают заметной прозрачностью. Их толщина составляет от единиц до десятков нанометров. При такой толщине слои имеют гранулярную структуру, сильно изменяющуюся по мере роста толщины слоя. Поэтому говорить о такой пленке как об однородном образовании можно только с большой степенью приближения, когда речь идет о больших площадях, линейные размеры которых, как минимум, имеют порядок длины световой волны λ или превосходят ее в несколько раз.

Для практики имеют значение следующие оптические характеристики металлических слоев: энергетические коэффициенты отражения R , пропускания T , поглощения A , фазовые сдвиги при отражении и прохождении света сквозь покрытие. Эти величины можно определить на практике

в результате прямых измерений. Указанные выше характеристики зависят не только от свойств покрытия, но и от показателей преломления обрамляющих сред, т. е. от показателей преломления подложки и окружающей среды. Поскольку обычно это разные материалы, то их показатели преломления также разнятся. В связи с этим оптические характеристики металлической пленки будут зависеть от того, с какой стороны на нее падает свет: со стороны подложки или со стороны металлического покрытия. Условимся, что характеристики, относящиеся к случаю падения излучения со стороны подложки, будут помечаться штрихом (R' , A' и т. д.).

На практике металлические слои применяются или при создании светоделителей, или при изготовлении зеркал, обладающих коэффициентом отражения, близким к единице. Поглощение в таких пленках должно быть сведено к минимуму при сохранении высокой механической прочности и длительного срока службы. В видимой области спектра этим требованиям удовлетворяют пленки Ag. Их используют при изготовлении интерферометров. Однако в ультрафиолетовой (УФ) области спектра коэффициент отражения серебряных пленок мал. Высоким коэффициентом отражения в УФ-области обладают пленки алюминия. Их можно использовать и в видимой области спектра, если не очень важны потери на поглощение. Кроме того, пленки Al обладают высокой антикоррозийной устойчивостью. В тех случаях, когда нужна особая химическая и механическая прочность покрытия, используются пленки родия. Однако коэффициент поглощения этих пленок выше, чем пленок Al. Пленки платины используются в ослабителях излучения, поскольку коэффициент отражения этих пленок практически не зависит от λ .

Рассмотрим отражение и пропускание света тонкими металлическими пленками с точки зрения электродинамики. Поскольку рассматриваемые пленки поглощающие, то показатель преломления будет комплексной величиной

$$\hat{n}_1 = n_1 - ik_1,$$

где k_1 – показатель ослабления амплитуды волны.

Возможность поглощения излучения в подложке также не следует исключать, т. е. $\hat{n}_2 = n_2 - ik_2$. На всех границах раздела должно выполняться условие синусов, т. е.

$$n_0 \sin \alpha_0 = \hat{n}_1 \sin \hat{\alpha}_1 = \hat{n}_2 \sin \hat{\alpha}_2.$$

Здесь n_0 – показатель преломления окружающей среды (воздуха), α_0 – угол падения излучения на пленку, $\hat{\alpha}_1$ и $\hat{\alpha}_2$ – углы преломления в пленке и подложке. Поскольку пленка и подложка – среды поглощающие, то углы $\hat{\alpha}_1$ и $\hat{\alpha}_2$ также будут комплексными величинами, не имеющими реального физического смысла.

Заметим, что в металлических пленках отсутствуют интерференционные эффекты, которые имеют место в диэлектрических покрытиях и играют там основную роль. Поглощение света в металлических слоях очень высоко. В связи с этим они становятся непрозрачными прежде, чем достигнут толщины, соответствующей первому интерференционному экстремуму в соответствующей области спектра. Поэтому при достаточной толщине покрытий нет необходимости рассматривать многократное отражение луча, хотя коэффициент отражения таких покрытий может быть очень высоким. Следует учитывать только однократное отражение. Однако если рассматривать очень тонкие пленки, то учет многократного отражения необходим.

Предварительно рассмотрим предполагаемый характер зависимости R и R' от d . При $d \rightarrow \infty$ R и R' будут стремиться к значениям коэффициентов отражения для массивных образцов. Поскольку $|n_0 - n_1| > |n_1 - n_2|$, то R должен превышать R' при любых значениях d .

Вначале рассмотрим отражение от металлического слоя при падении излучения со стороны воздуха (рис. 17.1, сплошные линии).

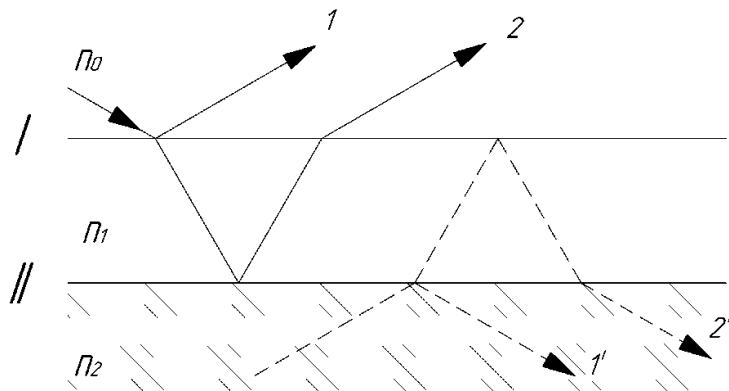


Рис. 17.1. Отражение луча от металлического слоя

В этом случае коэффициент отражения от поверхности I выше, чем от поверхности II, т. е. при любой толщине покрытия преобладает волна, отраженная от поверхности I (луч 1). В то же время интенсивность луча 2 в результате поглощения излучения в пленке по мере роста толщины слоя будет падать.

С помощью формул Френеля можно показать, что разность фаз между лучами 1 и 2, а также 1' и 2' приблизительно равна $2d/3$, т. е. отраженные волны ослабляют друг друга, хотя и не гасят полностью. Поэтому по мере падения интенсивности луча 2 интенсивность отраженного излучения будет возрастать, пока не достигнет значения, соответствующего отражению от массивного образца (луч 2 полностью поглотится), т. е. с ростом d R будет постепенно возрастать, стремясь к некоторой постоянной величине.

При отражении от металлического слоя со стороны подложки (пунктирные лучи) коэффициент отражения от поверхности I по-прежнему выше коэффициента отражения от поверхности II, т. е. в начальный момент интенсивность луча 2' выше интенсивности луча 1'. Напомним, что лучи

ослабляют друг друга. По мере роста толщины слоя интенсивность луча $2'$ будет падать при неизменной интенсивности луча $1'$, что приведет к падению R' . Со временем (тем меньшим, чем выше k_1) их интенсивности выравниваются и R' примет нулевое значение. В дальнейшем главенствующая роль перейдет к лучу $1'$. По мере роста d в результате уменьшения интенсивности луча $2'$ R' будет расти, приближаясь к значению R' для массивного образца. Таким образом, на кривой $R'(d)$ при малых d возможно появление минимума, существование которого, как следует из вышесказанного, обусловлено амплитудными, а не фазовыми эффектами при интерференции отраженных волн.

17.2. Неметаллические покрытия

В зависимости от цели к тонким диэлектрическим пленкам предъявляются разнообразные требования. Критериями качества покрытий являются следующие их свойства: прозрачность, коэффициент преломления, однородность, относительная плотность, адгезия, твердость, механические напряжения, химическая и температурная стабильность, устойчивость к радиации.

Рассмотрим свойства некоторых наиболее часто используемых в оптике диэлектрических материалов. Ниже в таблице приведен их перечень с указанием показателя преломления n на определенной длине волны λ для конкретной температуры T подложки и области прозрачности.

Свойства диэлектрических материалов

Состав пленки n	λ , мкм	T , °C	Область прозрачности, мкм
PbTe	5,6	22	3,5–20
Ge	4,4	30	2–23
Si	3,4	22	1–9
ZnS	2,3	30	0,4–14
SiO	2,0	30	0,7–9
TiO	1,9	30	0,4–3
ZrO ₂	1,97	30	0,34–12
ThO ₂	1,95	30	0,3
PbF ₂	1,75	30	0,3–17
MgO	1,70	50	0,2–8
CeF ₃	1,63	300	0,3–5
Al ₂ O ₃	1,59	40	0,2–7
Si ₂ O ₃	1,55	30	0,4–9
ThF ₄	1,52	35	0,2–15
SiO ₂	1,45 1,46	30	0,2–9
MgF ₂	1,38	30	0,4–4
Na ₃ AlF ₆	1,32 1,35	30	0,2–14

Разобьем материалы на группы по их химическому составу и рассмотрим свойства наиболее часто используемых на практике веществ.

17.2.1. Фториды и другие галогениды

Наиболее часто используются криолит (смесь NaF и AlF_3), фториды магния и тория. Все вещества рассматриваемой группы легко испаряются и конденсируются. Некоторые из них легко растворимы в воде.

Криолит Na_3AlF_6 испаряют в тиглях из тугоплавких материалов. При нагревании криолит диссоциирует. При более низких температурах испарителя испаряется в основном NaF , показатель преломления которого колеблется в пределах 1,29–1,31, а при более высоких – AlF_3 ($n = 1,385$). Поэтому состав покрытия зависит от температуры испарителя и скорости испарения. Показатель преломления пленок криолита находится в области 1,28–1,36. Средней величиной считается $n = 1,35$. Как в процессе испарения, так и после него пленки поглощают пары воды. Поскольку NaF растворим в воде, то при высокой влажности пленки неустойчивы. Несмотря на отмеченные недостатки, пленки криолита часто используются в сочетании с ZnS , поскольку имеют самый низкий в настоящий момент показатель преломления.

Широкое распространение получили пленки MgF_2 . Материал испаряют из танталовых или вольфрамовых лодочек. Длинноволновая граница пропускания составляет 4 мкм, поскольку при толщине покрытия 1 мкм ($\lambda / 4$) в пленке начинают появляться трещины. Показатель преломления слоя зависит от температуры подложки и количества поглощенной воды. В вакууме показатель преломления пористого слоя составляет 1,32–1,33. Поглощение паров воды ($n = 1,33$) на воздухе приводит к возрастанию показателя преломления до 1,38. Пленки имеют кристаллическую структуру. Призматические кристаллиты растут в направлении падения струи пара. Величина зерна зависит от температуры осаждения и толщины покрытия. Механические свойства пленок зависят от их плотности. Плотные пленки очень стабильны, тверды, обладают высокой адгезией. Если пленка нанесена на холодную подложку, то адгезия невысока.

Пленки ThF_4 используют в многослойных зеркалах в лазерной технике. Они хорошо совместимы с пленками ZnS и образуют толстые слои, которые не отслаиваются и не растрескиваются, что позволяет использовать их в ИК-области спектра. Недостатком ThF_4 является его радиоактивность.

Кроме того, в оптических системах используются слои CeF_3 , LiF , BaF_2 , PbF_2 и др.

17.2.2. Сульфиды и селениды

Слои ZnS используются в сочетании с пленками MgF_2 , ThF_4 , Na_3AlF_6 . Пленки ZnS могут работать в ИК-диапазоне, поскольку толстые слои ZnS

не растрескиваются и не отслаиваются, значения их показателя преломления колеблются в видимой области от 2,6 до 2,3. В ИК-диапазоне $n \approx 2,3$. Пленки стабильны, не подвержены старению. Адгезия покрытий зависит от чистоты и предварительной обработки подложки. Испаряется ZnS приблизительно при 1200 °С, при нагреве диссоциирует на Zn и S, при конденсации вновь ассоциирует в ZnS. Этим объясняется зависимость коэффициента конденсации от температуры подложки. Испаряют сульфид цинка из молибденовых и вольфрамовых лодочек.

Кроме ZnS иногда используют слои ZnSe и Sb₂S₃.

17.2.3. Оксиды

Пленки оксидов обладают высокой механической прочностью, химически стабильны. Их показатели преломления перекрывают широкий диапазон. Однако процесс нанесения окисных слоев более сложен, так как они зачастую взаимодействуют с материалом тиглей или диссоциируют при высокой температуре. Низкие значения показателя преломления имеют слои SiO₂ и Si₂O₃, средние – SiO, Al₂O₃, MgO, ThO₂, ZrO₂ и окислы редкоземельных металлов, высокие – CeO₂, TiO₂.

Качественные пленки SiO₂ получают в результате испарения SiO₂ дефокусированным электронным лучом на нагретой до 150 °С подложке. Возможно также их получение в результате реактивного испарения SiO. Пленки, осажденные на горячую подложку, обладают хорошей адгезией, высокой механической и химической стабильностью. Пленки SiO₂ используются в многослойных покрытиях.

Пленки Si₂O₃ получают реактивным испарением SiO в атмосфере кислорода. Их используют в многослойных системах, а также в качестве покрытий, стабилизирующих температуру спутников.

Если монооксид кремния испарять в отсутствие кислорода, то вырастают пленки SiO. При быстром испарении в высоком вакууме получают пленки с высокой механической и химической стабильностью. На воздухе пленки покрываются тонким (около 2 нм) слоем SiO₂, предотвращающим дальнейшее окисление. Работают в ИК-диапазоне.

Пленки Al₂O₃ получают только электронно-лучевым испарением. Пленки аморфны. Адгезия чрезвычайно высока. Используются в многослойных просветляющих покрытиях, в качестве защитных покрытий металлических зеркал, а также для стабилизации температуры спутников.

ThO₂ радиоактивен. Испаряют его электронным лучом. Используют в сочетании с SiO₂ в многослойных системах для УФ-области.

Слои ZrO₂ получают электронно-лучевым испарением. Их показатель преломления зависит от температуры подложки. Возможно образование неоднородных пленок, обусловленное структурными эффектами. Пленки

ZrO_2 обладают отличными механическими и химическими свойствами, хорошо сочетаются с пленками других окислов и MgF_2 .

Показатель преломления слоев окислов редкоземельных элементов (La_2O_3 , Pr_6O_4 , Nd_2O_3 , Sc_2O_3 , Y_2O_3) колеблется в пределах 1,9–2,1. Слои прозрачны в области ближнего УФ и видимой области. Испаряют материалы из лодочек. Однородность пленок и воспроизводимость их свойств повышаются при реактивном испарении на горячую подложку. Все пленки, за исключением La_2O_3 , достаточно стабильны.

Слои CeO_2 наносят электронно-лучевым и резистивным испарением. Применение в ИК-диапазоне ограничено из-за повышенного рассеяния. Показатель преломления сильно зависит от температуры подложки, что обусловлено различной концентрацией границ зерен. Кристаллы имеют кубическую структуру. Слои стабильны, тверды, обладают высокой адгезией. Используются в многослойных системах совместно со слоями MgF_2 и SiO_2 .

Пленки TiO_2 химически устойчивы, тверды, обладают высокой адгезией. Способы получения разнообразны. Наиболее высококачественные слои получают реактивным испарением TiO . Рост температуры подложки приводит к изменению структуры пленок. Наблюдается переход от аморфных пленок к пленкам со структурой анатаза или рутила. Кроме того, показатель преломления слоев зависит от скорости конденсации и давления в камере. В пленках TiO_2 , полученных реактивным испарением, наблюдаются повышенные растягивающие напряжения. Используются в многослойных системах в сочетании со слоями SiO_2 .

Слои из шоттовского стекла 8329 можно наносить без заметной декомпозиции. Показатель преломления таких слоев 1,47. Покрытие используется для защиты линз, изготовленных из органических материалов, а также как антикоррозионное.

Используются также окислы других материалов, например, MgO , Sb_2O_3 , As_2O_3 и т. д.

17.2.4. Полупроводниковые материалы

Полупроводниковые слои обладают высокими показателями преломления. При испарении слоев Si, Ge, Te следует устранить взаимодействие с материалом тигля и остаточными газами. Необходимо следить за структурой пленок в процессе конденсации и после ее завершения. Полупроводниковые соединения, особенно $A^{III}B^V$, при испарении диссоциируют, поэтому при нанесении таких слоев используют взрывное испарение или другие сложные методы.

Пленки кремния тверды и устойчивы. Используются в многослойных просветляющих покрытиях.

Показатель преломления слоев германия (4,4) выше, чем у массивного образца (4,0), и зависит от способа нанесения. Пленки Ge прочны. Используются в многослойных системах совместно с пленками SiO и ZnS.

Слои теллура не обладают достаточной механической прочностью.

17.2.5. Органические пленки и пленки из многокомпонентных смесей

Пленки кремнийорганических соединений используются для получения световодов с предельно низкими потерями. Влагозащитные покрытия получают с помощью пленок фтористого углерода. Существуют и другие виды применения, о которых будет упомянуто ниже.

Поскольку круг веществ, пригодных для нанесения оптических покрытий, ограничен, предпринимаются попытки получения слоев с необходимым значением n в результате напыления многокомпонентных смесей.

Существует несколько методов нанесения таких систем. Очевидно, проще всего наносить заранее приготовленную смесь из одного испарителя. Но в ряде случаев, когда температуры испарения компонентов смеси значительно различаются, фракционирование ограничивает применение этого способа. Возможно использование взрывного испарения, но еще более удобен метод распыления, когда каждый из компонентов наносится на подложку П (рис. 17.2) из отдельного испарителя (S_1-S_4). В этом случае необходим контроль за скоростью напыления из каждого из источников, который осуществляют с помощью датчиков X_1-X_4 . От попадания паров из «чужих» источников датчики защищены экранами Э. Скорость напыления можно изменять, варьируя температуру источников. Иногда для фиксирования скорости напыления из двух источников одновременно удобно использовать один датчик, а второй – для контроля скорости нанесения только из одного из них.

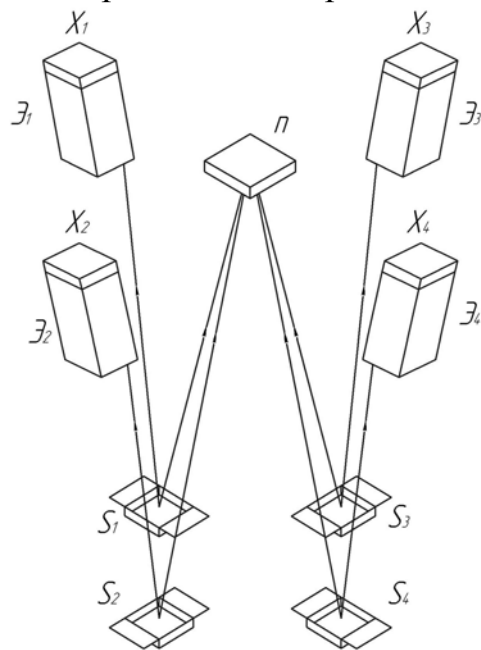


Рис. 17.2. Нанесение многослойного покрытия из отдельных испарителей

Неоднородные пленки, т. е. пленки, у которых показатель преломления изменяется в направлении перпендикуляра к подложке, также можно получать вышеописанным способом. В этом случае по разработанной заранее программе изменяется скорость испарения каждого из материалов. Неоднородную пленку также можно получать испарением заранее подготовленной смеси из одного испарителя, температура которого изменяется по определенному закону.

Неоднородные пленки используют для получения ахроматических просветляющих покрытий, а также слабоотражающих поглощающих покрытий для солнцезащитных очков.

Глава 18. ВАКУУМНОЕ РАСПЫЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

18.1. Сущность метода

Рассмотрение методов получения оптических покрытий начнем с термического испарения. В этом случае распыляемый материал разогревают до достаточно высокой температуры одним из нижеперечисленных способов: в результате подвода джоулева тепла (резистивный нагрев), бомбардировки испаряемого материала высокоэнергетичными электронами (электронно-лучевое испарение) и поглощения квантов электромагнитного поля (лазерный нагрев).

Вакуумные установки, используемые для нанесения оптических покрытий, удовлетворяют следующим требованиям:

- обеспечивают давление остаточных газов порядка 10^{-6} Па;
- позволяют измерить давление паров в камере в процессе испарения;
- создают возможность поочередного или одновременного испарения нескольких материалов;
- в процессе нанесения обеспечивают контроль толщины напыляемых слоев и их оптических констант;
- обеспечивают напыление равномерных по толщине слоев на больших площадях.

Принципиальная схема вакуумной установки для нанесения оптических слоев термическими методами приведена на рис. 18.1. На плите 1 установлен вакуумный колпак 2. Система насосов 3 создает под колпаком необходимое разрежение. Испаряемый материал помещают в испаритель 4, электропитание которого обеспечивает блок 5. Прекратить поступление распыляемого материала на подложки 6, размещенные на вращающемся столике 7, можно с помощью подвижной заслонки 8. Контроль толщины наносимых слоев осуществляется с помощью источника света 9 и измерительной системы 10.

В настоящий момент наиболее распространены испарители в виде проволочной спирали, лодочки, ленты с углублением, выполненные из металлов с высокой температурой плавления и низкой упругостью паров (вольфрам, молибден, тантал).

Для распыления больших количеств материалов применяются тигельные испарители. Тигли бывают открытого и закрытого типов. Их изготавливают из графита, нитрида бора, тугоплавких металлов и окислов.

Процесс нанесения слоя можно представить следующим образом. Материал помещают в испаритель и разогревают до нужной температуры. Молекулы, обладающие достаточным запасом энергии, покидают испаритель

и направляются в произвольном направлении, в том числе и к подложке, находящейся на расстоянии h от испарителя. Часть молекул конденсируется на подложке, на которой начинает расти слой напыляемого материала. Итак, процесс нанесения покрытия можно разделить на три этапа: испарение, перенос вещества от испарителя к подложке и конденсация.

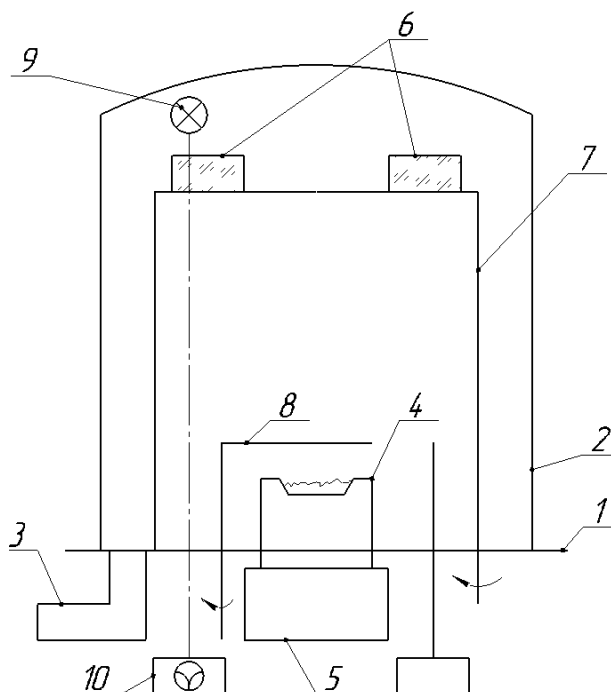


Рис. 18.1. Схема вакуумной установки

18.2. Подготовка подложек к нанесению покрытий

Поскольку подложка представляет собой оптическую деталь, предназначенную для работы в приборе, она должна удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к этой детали, т. е. быть прозрачной в рабочей области спектра, однородной, поддаваться полировке, иметь заданную форму и размеры.

Перед нанесением покрытия подложку подвергают чистке. Под *чисткой* понимают разрыв связей между молекулами адсорбированного слоя и подложки. Способ чистки подбирается эмпирически. Различные материалы подложек обычно требуют разных методов очистки. Критериями подбора способа чистки являются процент выхода годных деталей и надежность работы покрытия.

Различают следующие виды загрязнений подложек: силикаты (песок, зола, пепел), различные волокна (нити хлопчатобумажных и синтетических тканей), окислы, органические материалы (масла) и т. д.

Способы очистки подложек основаны на воздействии на них или химических реагентов, или температуры и ионов.

Основные методы очистки подложек сведены в таблицу (табл. 18.1).

Методы очистки подложек

Метод	Реагент	Действие
1	2	3
Химическая обработка растворителями	Петролейный эфир	Растворяет минеральные, животные и растительные жиры, воск, смолу и т. д.
	Спирт этиловый гидролизный высшей очистки (4 % H ₂ O)	Удаляет мыла, следы «чистых» пальцев, однако из-за медленного испарения воды возможны остатки мазков. Не растворяет минеральные масла и животные жиры
	Спирт этиловый осушенный (2 % H ₂ O)	Удаляет следы мазков
	Смесь петролейного эфира с 96–98%-м этиловым спиртом. Объемная доля эфира 88–90 %	Уменьшает электризацию поверхности детали, пылинки легко снимаются. Смесь быстро улетучивается. Состав рекомендуется для окончательной очистки
Химическая обработка растворами щелочей	КОН; NaOH	Омыляет жиры, снимает поверхностное напряжение, обеспечивает активацию поверхности. При использовании метода следует учитывать действие раствора на материал подложки
Химическая обработка кислотами	Хромовая, азотная, плавиковая, смесь хромовой и серной кислот	Переводит загрязнения в более растворимые соединения. В этом случае также следует учитывать возможность взаимодействия материала подложки с кислотой
Термообработка		Подложку отжигают в вакууме при температуре 200–300 °С и более (в зависимости от природы подложки), что приводит к удалению адсорбированных газов и влаги с поверхности подложки. Метод не может быть использован при обработке нетермостойких, а также крупногабаритных деталей

1	2	3
Ионное воздействие (тлеющий разряд и ионное травление)		В результате бомбардировки ионами удаляются адсорбированные газы, разрушаются связи органических загрязнений с подложкой, труднолетучие загрязнения расщепляются с образованием летучих компонентов. Если на поверхности подложки на воздухе возникли новообразования, их размерный съем проводят с применением высокочастотного ионно-плазменного травления. Режим тлеющего разряда и тип ионов подбираются эмпирически в зависимости от материала подложки

18.3. Формирование покрытия

Существуют две основные группы методов получения оптических покрытий. Это вакуумные и химические методы. Обе группы находят широкое применение в технике. Существующие методы формирования покрытий можно описать следующей блок-схемой (рис. 18.2).

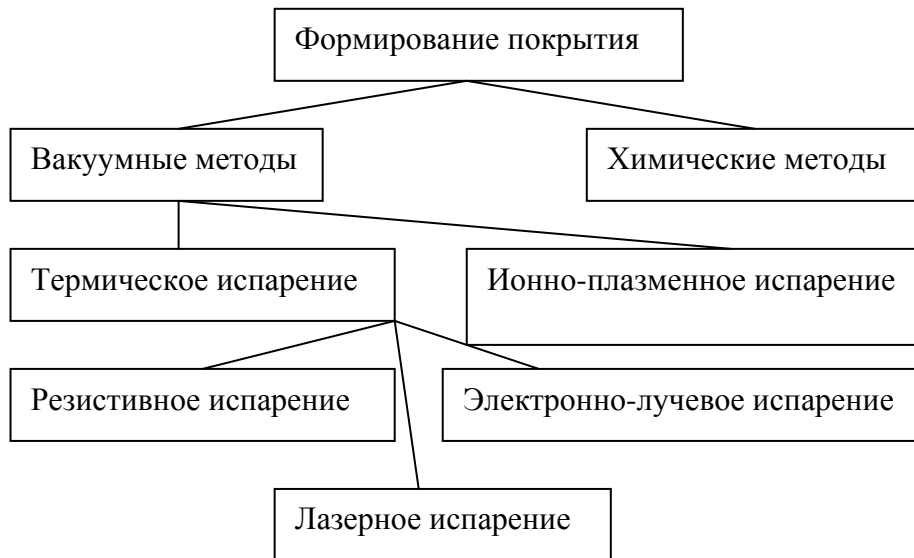


Рис. 18.2. Методы формирования покрытий

В технической литературе вакуумное термическое испарение зачастую называют просто вакуумным распылением материалов.

18.4. Испарение материалов

К испаряемому материалу тем или иным способом подводится энергия. В результате его температура растет. Над материалом образуется облако пара. Давление насыщенных паров P_s данного материала при температуре T описывается соотношением

$$\lg P_s = A - B / T,$$

где A и B – константы испаряемого вещества.

Существует понятие «условная температура испарения» $T_{\text{усл}}$. Это температура, при которой $P_s = 1,33$ Па. Если $T_{\text{усл}}$ больше температуры плавления $T_{\text{пл}}$ испаряемого материала, то испарение происходит из расплава. Если $T_{\text{усл}} < T_{\text{пл}}$, то имеет место возгонка.

Скоростью испарения ω называют количество вещества, испаряемого в единицу времени, с, с единицы поверхности, см^2 . Эксперимент дает следующее выражение для расчета ω :

$$\omega = C(P_s - P) / P_0.$$

Здесь C – константа, обусловленная природой испаряемого вещества, P – давление над поверхностью испаряемого материала в момент напыления, P_0 – давление остаточных газов, которое должно быть достаточно низкой величиной, поскольку молекулы остаточных газов могут оказаться замурованными в пленке, т. е. будут загрязнять покрытие. Во-вторых, молекулы испаряемого материала из-за рассеяния на молекулах остаточных газов вообще могут не попасть на подложку.

18.5. Перенос вещества от испарителя к подложке

Рассчитаем максимально допустимое значение P_0 . Количество молекул N распыляемого материала, достигших подложки, при условии, что коэффициент конденсации равен единице, связано с числом молекул N_0 , покинувших за это время испаритель, соотношением

$$N = N_0 \exp(-h / \lambda), \quad (18.1)$$

где h – расстояние от испарителя до подложки;

λ – длина свободного пробега молекул.

Для того чтобы молекулы испаряемого материала достигали подложки, необходимо, чтобы $\lambda \geq h$. Если $\lambda \gg h$, то из (18.1) получим

$$N = N_0(1 - h / \lambda).$$

Таким образом, число рассеянных молекул $N_{\text{рас}}$ составляет

$$N_{\text{рас}} = N_0 h / \lambda.$$

Если P_0 выражено в паскалях, то λ можно рассчитать по формуле

$$\lambda = 0,66 / P_0, \text{ см.} \quad (18.2)$$

Минимальное значение λ , при котором возможно нанесение слоя, равно h . В используемых на практике установках $h \approx 50$ см. Тогда из (18.2) получим максимальное значение $P_0 \approx 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па, при котором на подложке начнет расти слой. Однако чтобы исключить вредное влияние газов, десорбированных стенками камеры, эту величину следует уменьшить приблизительно еще на порядок. Таким образом, молекулы начнут достигать подложки при давлении остаточных газов около 10^{-3} Па.

В табл. 18.2 приведены результаты расчета влияния давления остаточных газов и скорости роста толщины слоя на загрязнение покрытий. Расчет проведен для пленок олова, напыляемых в атмосфере кислорода. В таблице указана относительная величина коэффициента k , равного отношению числа молекул кислорода, оседающих на единице поверхности в единицу времени, к числу молекул олова, осевших на этой же поверхности за это же время. Коэффициент конденсации взят равным 0,1. Чистота пленки считается приемлемой, если $k = 10^{-3}$. Таким образом, чистую пленку олова можно получить, как следует из табл. 18.2, при давлении кислорода в камере 10^{-7} мм рт. ст. и скорости роста толщины слоя 10 нм/с или давлении 10^{-9} мм рт. ст. и скорости 0,1 нм/с.

Таблица 18.2

Зависимость скорости роста пленки
от давления остаточных газов в камере

P_0 , мм рт. ст.	Скорость роста толщины слоя, нм/с			
	0,1	1,0	10,0	100,0
	k			
10^{-9}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
10^{-7}	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
10^{-5}	10,0	1,0	10^{-1}	10^{-2}
10^{-3}	10^3	10^2	10,0	1,0

Для достижения высокого вакуума в системах используются разнообразные диффузионные и турбовакуумные насосы. Предварительное разрежение создается форвакуумными насосами. Скорость откачки высоковаку-

умных насосов составляет $(0,5-7,0) \cdot 10^3$ л/с. Для их успешной работы скорость откачки форвакуумных насосов должна составлять, как минимум, десять объемов вакуумной камеры в секунду.

Состав атмосферы в вакуумной камере отличается от состава атмосферы в окружающем пространстве. Первый зависит от проницаемости стенок камеры, состава рабочих жидкостей насосов, десорбции газов стенками камеры и арматурой. Понизить давление остаточных газов помогают размещенные в камере азотные ловушки. Остаточные газы не должны вступать в химические реакции со стенками камеры и испаряемым веществом.

Полезное использование испаряемого материала зависит от распределения потока паров в камере, которое определяется устройством используемого испарителя. При термическом испарении коэффициент полезного использования вещества составляет приблизительно 20 %.

18.6. Способы получения однородных по толщине покрытий

18.6.1. Условия получения однородных покрытий

При нанесении конкретного покрытия определенные требования предъявляются к распределению толщины слоя по поверхности подложки: распределение должно быть или равномерным по всей подложке (зеркала, интерференционные фильтры, просветляющие покрытия и т. д.), или изменяться по определенному закону (интерференционные фильтры переменной толщины, ослабители и т. д.). Распределение слоя по толщине зависит от формы подложки, ее расположения относительно испарителя, распределения температуры по поверхности подложки, чистоты подложки, конструкции испарителя.

Распределение паров испаряемого вещества в пространстве определяется конструкцией испарителя. Используемые на практике испарители по диаграмме направленности потока молекул можно разделить на точечные, поверхностные, протяженные и тигельные.

В идеальном случае точечный испаритель представляет собой малую сферу, температура поверхности которой постоянна. Испаритель можно считать малым, если его линейные размеры на порядок меньше расстояния от испарителя до приемной поверхности. Поскольку такой испаритель симметричен, то испарение происходит во всех направлениях равномерно, т. е. масса вещества dm_T , испаряемая в телесном угле $d\omega$ (рис. 18.3) в единицу времени в любом направлении, задается соотношением

$$dm_T = \frac{m}{4\pi} d\omega.$$

Здесь m – скорость испарения со всей поверхности испарителя, г/с.

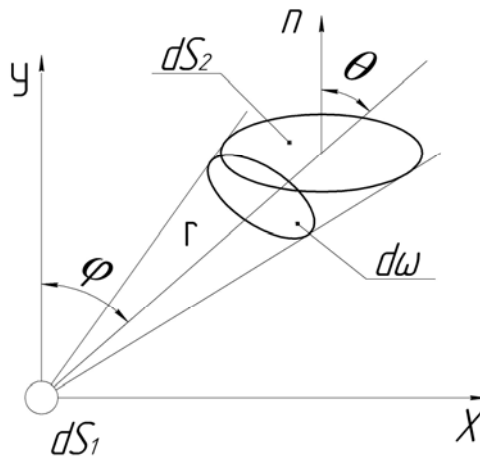


Рис. 18.3. Испарение материала точечным испарителем

Примером точечного испарителя может быть острие из проволоки испаряемого материала, разогретое до образования капли электронной бомбардировкой, или, с определенной степенью приближения, расплавленная капля испаряющегося вещества, не смачивающая разогретую поверхность, на которой она находится.

Поверхностный испаритель представляет собой малую по сравнению с расстоянием до приемной поверхности площадку, с которой происходит испарение вещества в одну сторону в пределах некоторого телесного угла. Примером может служить испарение вещества из лодочек. Поверхностный испаритель является направленным испарителем. Согласно закону Кнудсена количество вещества $dm_{\text{п}}$, г, испаренного в единицу времени в пределах телесного угла $d\omega$ (рис. 18.4) в направлении, которое составляет угол φ с нормалью к поверхности испарителя, задается выражением

$$dm_{\text{п}} = \frac{m}{\pi} \cos \varphi d\omega,$$

где m – скорость испарения со всей поверхности испарителя.

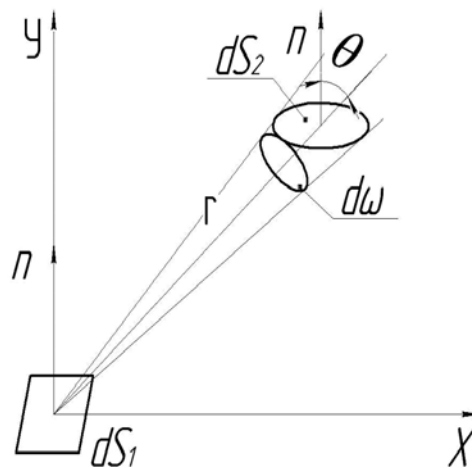


Рис. 18.4. Испарение вещества в пределах телесного угла $d\omega$

Испарение подчиняется закону Кнудсена, если:
 камера откачана до давления, при котором рассеяние молекул испаряемого вещества на молекулах остаточных газов практически исключено;
 скорость испарения невелика и столкновениями испаряемых молекул между собой можно пренебречь;
 коэффициент конденсации равен единице.

Эти требования довольно легко осуществить. Они будут выполняться уже при вакууме 10^{-4} мм рт. ст., если температура испарителя составляет приблизительно $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, а стеклянная подложка тщательно почищена.

Протяженный источник можно представить в виде цилиндра, диаметр которого мал по сравнению с образующей, а температура поверхности постоянна.

Наиболее общий случай из рассмотренных представляет собой поверхностный испаритель, поскольку точечный и протяженный испарители можно рассматривать как частные случаи поверхностного.

В случае тигельных испарителей количество вещества, распыленного в пределах телесного угла $d\omega$, в направлении, составляющем угол φ с нормалью к поверхности испаряемого материала, пропорционально $\cos^n \varphi$, где $n = f(\varphi)$, и зависит от конструкции испарителя.

Количество вещества, осевшего в единицу времени на поверхности ds_2 (см. рис. 18.3 и 18.4), нормаль к которой составляет угол θ с направлением распространения потока молекул, можно рассчитать из соотношений

$$dm_{\Gamma} = \frac{m \cos \theta}{4\pi r^2} ds_2; \quad (18.3)$$

$$dm_{\Pi} = \frac{m}{\pi} \cos \varphi \cdot \cos \theta \frac{ds_2}{r^2}. \quad (18.4)$$

Если на подложке осаждается однородный слой с плотностью ρ , $\text{г}/\text{см}^3$, то легко показать, что скорости роста толщины слоя d , $\text{см}/\text{с}$, для точечного d_{Γ} и поверхностного d_{Π} испарителей будут рассчитываться по выражениям

$$d_{\Gamma} = \frac{m \cos \theta}{4\pi \rho r^2}; \quad (18.5)$$

$$d_{\Pi} = \frac{m \cos \theta \cdot \cos \varphi}{\pi \rho r^2}. \quad (18.6)$$

Если коэффициент конденсации отличен от единицы, то он должен войти множителем в выражения (18.3)–(18.6).

На практике испарения преимущественно производятся на плоские и сферические поверхности. Рассмотрим эти случаи.

18.6.2. Испарение с малой площадки на параллельную ей плоскую поверхность

Толщина слоя (везде, если не оговорено особо, имеется в виду скорость роста толщины слоя, т. е. толщина слоя, нанесенного в единицу времени) в точке А (рис. 18.5) будет описываться соотношением

$$d_{\Pi} = \frac{m \cos^2 \theta}{\pi r} = \frac{mh^2}{\pi r^4} = \frac{mh^2}{\pi r(h^2 + \delta^2)^2}. \quad (18.7)$$

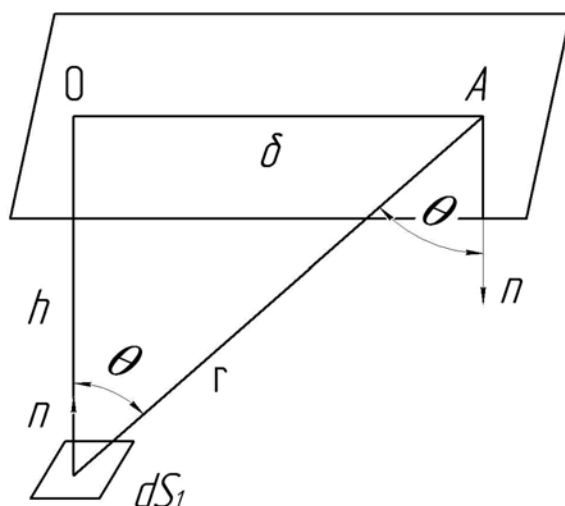


Рис. 18.5. Испарение с малой площадки

В точке О, расположенной непосредственно над испарителем (см. рис. 18.5), получим

$$d_{\Pi O} = \frac{m}{\pi r h^2}.$$

Следовательно,

$$d_{\Pi} / d_{\Pi O} = h^4 / (h^2 + \delta^2)^2 = 1 / \left[1 + (\delta / h)^2 \right]^2. \quad (18.8)$$

18.6.3. Испарение с малого точечного испарителя на плоскую поверхность

Если испарение происходит с малой сферы (см. рис. 18.4), то очевидно, что

$$d_{\Gamma} = mh / 4\pi r^3 = mh / 4\pi r(h^2 + \delta^2)^{3/2}. \quad (18.9)$$

$$d_{\text{по}} = m / 4\pi\rho h^2.$$

$$d_T / d_{\text{по}} = h^3 / (h^2 + \delta^2)^{3/2} = 1 / \left[1 + (\delta / h)^2 \right]^{3/2}. \quad (18.10)$$

Как следует из (18.8) и (18.10), равнотолщинные слои можно получить, когда $h \gg \delta$ и составляет 2 м и более.

Равномерное по толщине покрытие, кроме того, можно получить на поверхности сферы, если точечный испаритель находится в ее центре или если малый поверхностный испаритель является частью этой же сферы ($\cos \theta / r^2 = \text{const}$).

18.6.4. Кольцевые испарители

На сравнительно больших площадях равнотолщинные покрытия можно получить, если точечные или поверхностные испарители расположить по окружности, лежащей в плоскости, параллельной приемной поверхности (рис. 18.6).

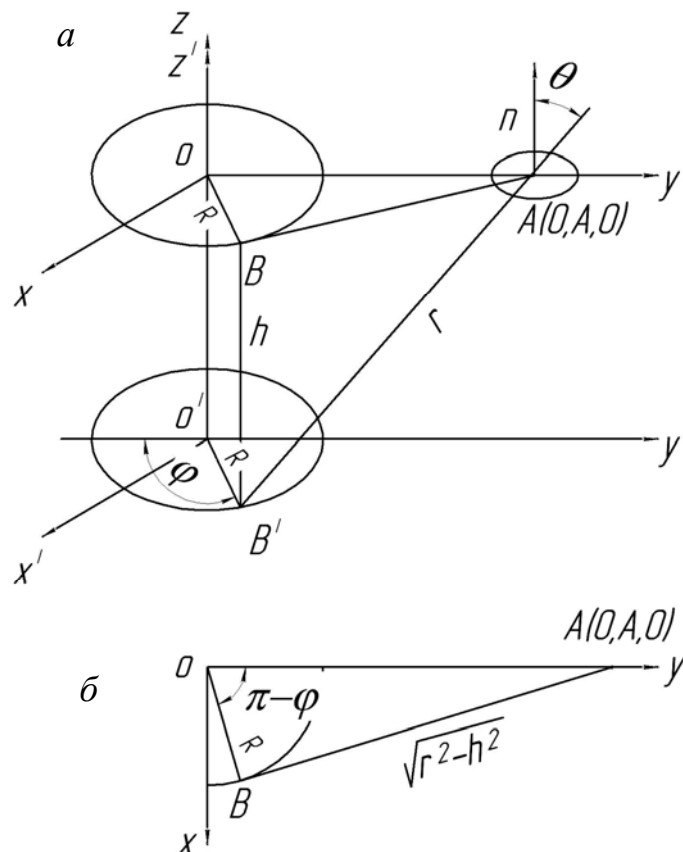


Рис. 18.6. Нанесение вещества с кольцевого испарителя

На рис. 18.6 испаритель радиуса R расположен в плоскости $X'O'Y'$. Параллельная ей плоскость XOY является приемной поверхностью. Рас-

считаем толщину слоя, нанесенного в окрестности точки $A(O, A, O)$ при распылении из кольцевого испарителя. Для этого слой разобьем на элементарные испарители, линейные размеры которых значительно меньше R . Предположим, что испарение происходит из одного из элементарных испарителей, расположенного в точке B' , положение которой задается углом φ . Угловой размер испарителя $\delta\varphi$.

Если из кольцевого испарителя в единицу времени испаряется m грамм вещества, то из элементарного испарится

$$\delta m = \frac{m}{2\pi} \delta\varphi$$

граммов. Согласно выражениям (18.7) и (18.9) для толщины слоя в окрестностях точки A при испарении из поверхностного и точечного испарителей соответственно получим

$$\delta d_{\Pi} = \beta \delta m h^2 / \pi r^4 = \beta m h^2 \delta\varphi / 2\pi^2 \rho r^4; \quad (18.11)$$

$$\delta d_{\Gamma} = \beta \delta m h / 4\pi r^3 = \beta m h \delta\varphi / 8\pi^2 \rho r^3. \quad (18.12)$$

Здесь β – коэффициент конденсации. Из рис. 18.6 видно, что

$$r^2 = R^2 + A^2 + h^2 + 2AR \cos \varphi,$$

где r – расстояние от источника B' до точки A .

Если учесть испарение из всех частей испарителя, то толщину слоя в окрестностях точки A можно получить в результате интегрирования выражений (18.11) и (18.12):

$$\begin{aligned} d_{\Pi} &= 2 \int_0^{\pi} \delta d_{\Pi} = \frac{\beta m h^2}{2\pi^2 \rho} \int_0^{\pi} \frac{2\delta\varphi}{\left[R^2 + A^2 + h^2 + 2AR \cos \varphi \right]^2} = \\ &= \frac{\beta m h^2}{\pi \rho} \frac{h^2 + A^2 + R^2}{\left[h^2 + (A+R)^2 \right]^{3/2} \left[h^2 + (A-R)^2 \right]^{3/2}}; \end{aligned} \quad (18.13)$$

$$d_{\Gamma} = \frac{\beta m h}{8\pi^2 \rho} \int_0^{\pi} \frac{2\delta\varphi}{(h^2 + R^2 + A^2 + 2AR \cos \varphi)^{3/2}}.$$

Значение d_{Γ} может быть определено численным методом.

Из (18.13) для толщины слоя над центром кольца в точке O получим

$$d_{\text{по}} = \frac{\beta m h^2}{\pi \rho} \frac{1}{(h^2 + R^2)^2}. \quad (18.14)$$

Тогда из (18.13) и (18.14) для относительной толщины слоя $(d/d_o)_{\text{п}}$ можно записать

$$\left(\frac{d}{d_o}\right)_n = \frac{(h^2 + A^2 + R^2)(h^2 + R^2)^2}{\left[h^2 + (A + R)^2\right]^{3/2} \left[h^2 + (A - R)^2\right]^{3/2}}.$$

Графическая зависимость $(d/d_o)_{\text{п}}$ от A/h для различных значений R/h показывает, что однородные по толщине покрытия на большой площади ($R \leq 0,5h$) можно получить из кольцевого испарителя, радиус которого сравним с расстоянием от испарителя до подложки. Наилучшая однородность наблюдается, когда R/h находится в пределах 0,7–0,8.

18.6.5. Сферические приемные поверхности

Практический интерес представляет использование сферических приемных поверхностей (рис. 18.7).

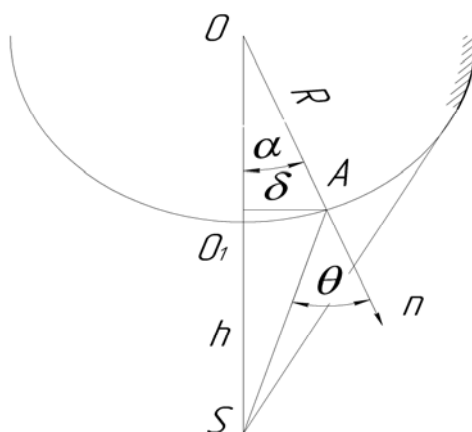


Рис. 18.7. Нанесение вещества на сферическую поверхность:
 S – испаритель; O – центр сферической приемной поверхности радиуса R

Относительная толщина слоя в точке A , как показывает расчет, в случае поверхностного испарителя определяется выражением

$$\left(\frac{d}{d_o}\right)_{\Pi} = \frac{1}{\frac{R}{h}} \cdot \frac{1 \pm \frac{R}{h} \mp \left[\left(\frac{R}{h}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{h}\right)^2 \right]^{1/2}}{\left\{ \left[1 \pm \left(\frac{R}{h}\right)^2 \mp \sqrt{\left(\frac{R}{h}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{h}\right)^2} \right]^2 + \left(\frac{\delta}{h}\right)^2 \right\}^{1/2}} \times \frac{\left[1 \pm \frac{R}{h} \right] \left[\left(\frac{R}{h}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{h}\right)^2 \right]^{1/2} \mp \left(\frac{R}{h}\right)^2}{\left\{ \left[1 \pm \left(\frac{R}{h}\right)^2 \mp \sqrt{\left(\frac{R}{h}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{h}\right)^2} \right]^2 + \left(\frac{\delta}{h}\right)^2 \right\}^{3/2}}, \quad (18.15)$$

где d – расстояние от точки A до оси симметрии OS ;

h – кратчайшее расстояние от источника S до приемной поверхности.

В случае же точечного испарителя получим

$$\left(\frac{d}{d_o}\right)_{\Gamma} = \frac{\left[1 \pm \frac{R}{h} \right] \left[\left(\frac{R}{h}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{h}\right)^2 \right]^{1/2}}{\frac{R}{h} \left\{ \left[1 \pm \frac{R}{h} \mp \sqrt{\left(\frac{R}{h}\right)^2 - \left(\frac{\delta}{h}\right)^2} \right]^2 + \left(\frac{\delta}{h}\right)^2 \right\}^{3/2}}. \quad (18.16)$$

В формулах (18.15) и (18.16) верхние знаки \pm относятся к выпуклой приемной поверхности (см. рис. 18.7), а нижние – к вогнутой.

В случае выпуклой приемной поверхности наблюдается эффект затенения: слой не будет осаждаться на заштрихованной части приемной поверхности (см. рис. 18.7). Максимальное значение δ находится по выражению

$$\left(\frac{\delta}{h}\right)_{\max} = \frac{R(1+2R/h)^{1/2}}{h(1+R/h)}.$$

18.7. Специальные методы получения однородных по толщине покрытий

18.7.1. Метод вращающейся заслонки

При использовании тигельных и поверхностных испарителей толщина слоя d_o непосредственно над испарителем оказывается большей, чем на

периферии. Для получения равнотолщинных слоев часть потока молекул нужно экранировать. Эта часть оказывается тем большей, чем меньше r_{mi} – расстояние от точки, расположенной непосредственно над испарителем, до точки, где исследуется толщина слоя.

Доля p потока, подлежащая экранированию, может быть рассчитана из выражения

$$p = (a - b) / a,$$

где $a = d_i / d_o$, $b = d_m / d_o$;

d_o – толщина слоя в точке O над испарителем;

d_m – толщина слоя в точке, расположенной на окружности радиуса r_m .

По результатам расчета изготавливается заслонка, которая размещается строго концентрично с источником между ним и подложкой и приводится в быстрое вращение. При медленном вращении заслонки однородность слоя будет зависеть от ее начального и конечного положений. Для получения равнотолщинных слоев эти положения должны совпадать.

Подобным образом можно рассчитать форму заслонки, обеспечивающую изменение толщины слоя по заданному закону. Заслонка, кроме того, может быть неподвижной, а подложка вращающейся и т. д. Во время нанесения слоя нельзя допускать экранирование части потока испаряемых молекул стенками испарителя.

Недостатком метода является его малая производительность, а также необходимость изготавливать индивидуальную заслонку в каждом конкретном случае профиля покрытия и размеров подложки.

18.7.2. Метод вращающейся подложки

Распределение потока распыляемых молекул в пространстве, как уже отмечалось, неоднородно. Устранения последствий этого недостатка можно добиться в результате вращения подложки. (Вращать испаритель невыгодно из-за наличия токовводов и возможной его вибрации). Существует несколько вариантов организации вращения подложек. Во-первых, подложка может вращаться вокруг собственной оси, совпадающей с осью испарителя. В таком положении может оказаться только одна-единственная подложка. Во-вторых, вращение может происходить вокруг оси испарителя, когда ось подложки с ней не совпадает. Кроме того, легко организовать вращение подложки вокруг собственной оси (планетарное вращение). В этом случае достигается большая однородность. При этом в одинаковом положении могут оказаться сразу несколько подложек, расположенных по окружности, концентричной с испарителем.

Рассмотрим возможность получения равнотолщинных слоев на подложке, принимающей участие одновременно в двух вращениях: вокруг

собственной оси $O''Z''$ (рис. 18.8) и вокруг оси $O'Z'$, параллельной ей, но находящейся вне подложки.

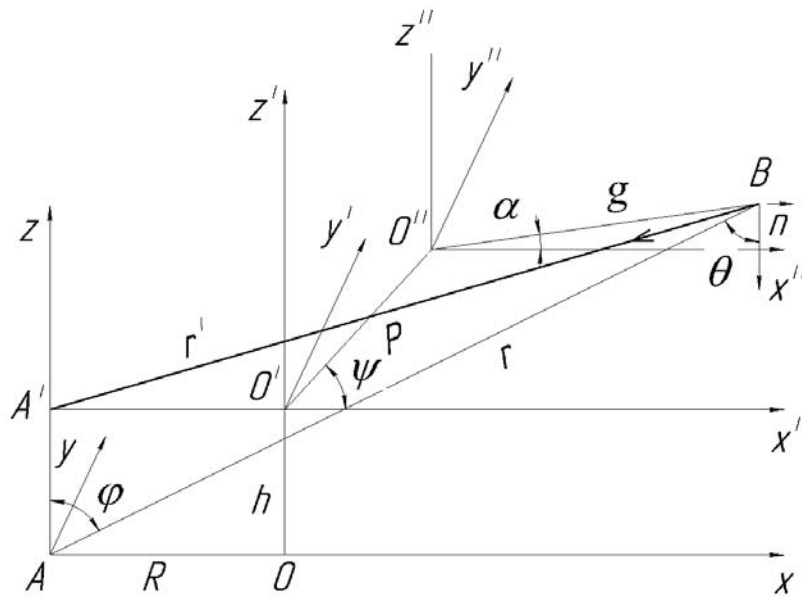


Рис. 18.8. Нанесение вещества на планетарно вращающуюся подложку

Ось испарителя AZ параллельна вышеупомянутым осям, но с ними не совпадает. Испаритель находится в точке A . Прямоугольные системы координат XYZ и $X'Y'Z'$ неподвижны и связаны с камерой. Плоскость $X'O'Y'$ является приемной поверхностью, параллельной плоскости XAY источника. Системы координат $X''Y''Z''$ связаны с приемной поверхностью и вращаются вместе с ней вокруг оси $O'Z'$.

На рис. 18.8: R – расстояние от источника до оси $O'Z'$ по перпендикуляру, h – расстояние от плоскости XAY источника до приемной поверхности $X'O'Y'$, B – точка на подложке, удаленная на расстояние g от ее центра O'' и на расстояние r от источника A , p – расстояние от оси вращения приемной поверхности до центра O'' подложки. Положение точек O'' и B в полярных системах координат задается параметрами p и ψ , а также g и α соответственно. Обозначим угловую скорость вращения приемной поверхности через ω_1 , ω_2 – угловая скорость вращения подложки, γ – их отношение, т. е. $\gamma = \omega_1 / \omega_2$. При равномерном вращении $\gamma = \psi / \alpha$.

Согласно (18.9) и (18.7) толщина слоя δd , нанесенного в окрестности точки B из точечного δd_{τ} и поверхностного δd_{Π} источников за время $\delta \tau$ при коэффициенте конденсации, равном β , будет

$$\delta d_{\tau} = \frac{\beta m}{4\pi p} \frac{h}{r^3} \delta \tau; \quad (18.17)$$

$$\delta d_{\Pi} = \frac{\beta m}{\pi p} \frac{h^2}{r^4} \delta \tau. \quad (18.18)$$

Можно показать, что в нашем случае

$$r^2 = R^2 + p^2 + g^2 + 2Rg \cos \alpha + 2Rp \cos \xi \alpha + 2Rg \cos(\xi + 1)\alpha + h^2.$$

Перейдем от переменной τ к новой переменной α . Поскольку $\omega_2 = \delta\alpha / \delta\tau$, то очевидно, что $\delta\tau = \delta\alpha / \omega_2$. Тогда из (18.17) и (18.18) можно получить

$$\delta d_{\tau} = \frac{\beta m}{4\pi p \omega_2} \frac{h}{r^3} \delta\alpha; \quad \delta d_{\pi} = \frac{\beta m}{\pi p \omega_2} \frac{h^2}{r^4} \delta\alpha.$$

Запишем толщину слоев, нанесенных за время поворота на угол α_1 :

$$d_{\tau} = \frac{\beta m h}{4\pi p \omega_2} \int_0^{\alpha_1} \frac{\delta\alpha}{r^3}; \quad d_{\pi} = \frac{\beta m h^2}{\pi p \omega_2} \int_0^{\alpha_1} \frac{\delta\alpha}{r^4}.$$

Под интегралами находятся периодические функции с периодом, являющимся наименьшим общим кратным чисел 2π , $2\pi / \gamma$ и $2\pi / (\gamma + 1)$. При достаточно высокой скорости вращения за N периодов функции будут нанесены слои толщиной

$$d_{\tau} = \frac{\beta m h N}{4\pi p \omega_2} \int_0^{\alpha_{\tau}} \frac{\delta\alpha}{r^3}; \quad d_{\pi} = \frac{\beta m h^2 N}{\pi p \omega_2} \int_0^{\alpha_{\tau}} \frac{\delta\alpha}{r^4}, \quad (18.19)$$

где α_{τ} – угол поворота за период функции.

При достаточно большом N можно пренебречь тем фактом, что за время вращения успело реализоваться нецелое число периодов подынтегральной функции. Чем выше скорость вращения, тем меньше возможная ошибка в толщине слоя Δd , которая описывается выражением

$$\Delta d \leq d / 2N,$$

где d – толщина наносимого слоя.

Интегралы (18.19) могут быть найдены численным методом.

Если $p = 0$, то двойное вращение переходит в одинарное, а получаемые результаты аналогичны кольцевому испарителю. Если $R = 0$, распределение также аналогично кольцевому испарителю, но качество покрытия лучше, чем в случае, когда $p = 0$, поскольку угловая неоднородность молекулярного потока в некоторой мере компенсируется за счет вращения вокруг оси $O'Z'$, расположенной вне подложки.

Зоной равнотолщинности называют зону, в пределах которой $|\Delta d / d_0| \leq 10^{-3}$. Зона представляет собой кольцо (рис. 18.9), площадь которого в относительных радиусах

$$S = \pi \left(\frac{p}{R} + \frac{g}{R} \right)^2 - \pi \left(\frac{p}{R} - \frac{g}{R} \right)^2 = 4\pi \frac{pg}{R^2},$$

т. е. величина зоны пропорциональна pg . При конструировании установок надо заботиться о том, чтобы величина зоны равнотолщинности была максимальной.

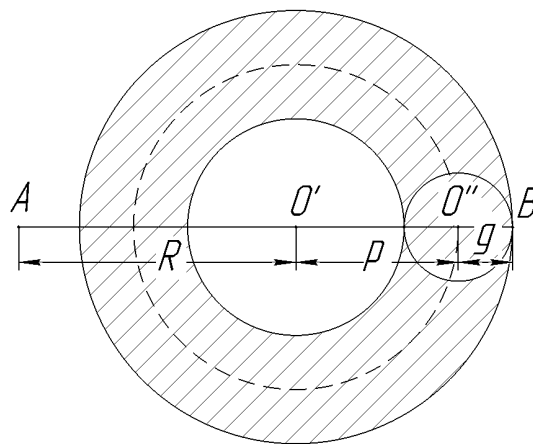


Рис. 18.9. Зона планетарного перемещения заготовки (заштрихованная часть), обеспечивающая нанесение равнотолщинного слоя

В общем случае планетарного вращения, когда p и R не равны нулю, площадь S зоны равнотолщинности возрастает. В то же время характер распределения материала по поверхности подложки сохраняется. Исключение составляет случай, когда $\gamma = 1$ и имеет место одинарное неэффективное вращение. Площадь зоны равнотолщинности слабо зависит от γ и определяется в основном величиной p (расстояние между осями вращения). При $p/R > 0,5$ равнотолщинности не добиться. Необходимо, чтобы $p/R \leq 0,5$. Оптимальная высота $(h/R)_{\text{опт}}$ также зависит от p/R , о чем свидетельствует табл. 18.3, составленная для $\gamma = 0,25$.

Таблица 18.3

Зависимость площади зоны равнотолщинности от геометрических параметров планетарного движения подложки

p/R	0	0,3	0,4	0,45	0,5
$(h/R)_{\text{опт}}$	1,4	1,23	1,18	1,12	1,02

Для получения равнотолщинных слоев методом планетарного вращения необходимо, кроме того, выполнить следующие условия, предъявляемые к испарителю: поверхность расплава должна иметь постоянную температуру, на ней не должно быть шлаков, стенки испарителя не должны экранировать поток испаряемых молекул.

Достоинством метода, кроме повышения качества покрытий, является увеличение производительности установки.

18.8. Электронно-лучевой нагрев

18.8.1. Физика процесса электронно-лучевого нагрева

При резистивном нагреве испаритель имеет ту же температуру, что и испаряемое вещество, что приводит к испарению материала испарителя, хотя и незначительному. В связи с этим изготавливаемые покрытия могут быть загрязнены материалом испарителя. Чистые слои можно получить, используя электронно-лучевой нагрев. В этом случае испаряемое вещество подвергается бомбардировке потоком ускоренных до энергии 5–10 кэВ электронов, которые передают ему большую часть своей кинетической энергии. Поскольку используется поток заряженных частиц, то пучок можно легко сфокусировать на испаряемый материал. В результате охлаждаемый проточной водой тигль, в котором помещено испаряемое вещество, остается холодным, в то время как испаряемый материал можно разогреть до температуры свыше 3000 °С. Между тиглем и разогретой зоной остается тонкий слой испаряемого вещества в твердой фазе, что исключает химическое взаимодействие между ними. Описываемый метод испарения осуществляется в нескольких вариантах в зависимости от метода ускорения электронов или способа закрепления испаряемого вещества в испарительной системе.

Пучок ускоренных электронов получают с помощью электронной пушки. Источником электронов является катод, изготовленный из тугоплавкого материала, поскольку он не должен терять жесткости при достаточно высоких температурах, необходимых для получения значительной электронной эмиссии. Чаще всего катоды изготавливают из вольфрама. В пушках предусмотрена быстрая смена катода, поскольку срок его службы из-за возможных химических реакций с испаряемым веществом и катодного распыления в результате бомбардировки положительными ионами ограничен. Пушка может работать при давлении в камере не ниже 10^{-4} мм рт. ст., что связано с возможным рассеянием электронов на молекулах остаточных газов, а также с потерями энергии электронами в результате ионизации молекул остаточных газов и испаряемого вещества. Ускоряющее электрическое поле (несколько киловольт) прикладывают или между катодом и испаряемым материалом (испарители с испаряемым анодом), или между катодом и анодом с отверстием, сквозь которое электроны попадают на испаряемое вещество (испарители с независимым анодом).

18.8.2. Испарители с испаряемым анодом

Одна из схем испарителей этого типа, так называемая схема подвешенной капли, приведена на рис. 18.10.

Катод выполнен в виде кольца, охватывающего конец испаряемого стержня, изготовленного из распыляемого материала. Под воздействием ударов высокоэнергетичных электронов на конце стержня образуется капля расплавленного вещества. Необходимо строго следить за энергией электронов, чтобы капля не оторвалась, что может иметь место, если ее температура заметно превысит температуру плавления веществ. Подложки располагают над каплей.

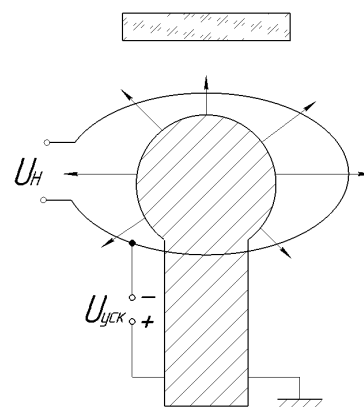


Рис. 18.10. Испаритель типа «подвешенная капля»

Описанным методом можно испарять металлы (проводники) с высоким коэффициентом поверхностного натяжения в расплаве. Давление паров при температуре плавления должно быть не ниже 10^{-3} мм рт. ст. При температурах материала, когда капля еще прочно связана со стержнем, испаряемые вещества можно расположить в ряд в порядке убывания скорости их испарения: Fe, W, Ni, Ta, Ag, Mo, Pt. Кроме того, методом подвешенной капли можно испарять титан и цирконий.

Недостатком метода являются ограниченная скорость испарения и коррозия катода в результате катодного распыления, поскольку он находится в зоне высокой плотности паров.

18.8.3. Электронные пушки с независимым анодом

Фокусировка пучка электронов в пушках этого типа осуществляется находящейся под потенциалом катода 1 (рис. 18.11) электростатической линзой 2 и анодом 3 с отверстием. Магнитные призмы 4 и 5 создают перпендикулярное рисунку магнитное поле B , искривляющее траекторию электронов и фокусирующее пучок на размещенном в тигле 6 веществе. Кроме того, магнитные призмы осуществляют сканирование пучка во взаимно перпендикулярных направлениях по испаряемому материалу. Размещение тигля в непосредственной близости от катода позволяет уменьшить его коррозию под воздействием положительных ионов испаряемого вещества.

При испарении диэлектриков тигли следует изготавливать из материалов с высокой электропроводностью, чтобы избежать скапливания зарядов на материале и, как следствие, отклонения электронного луча.

Недостатком метода является зарядка подложки в процессе нанесения покрытия.

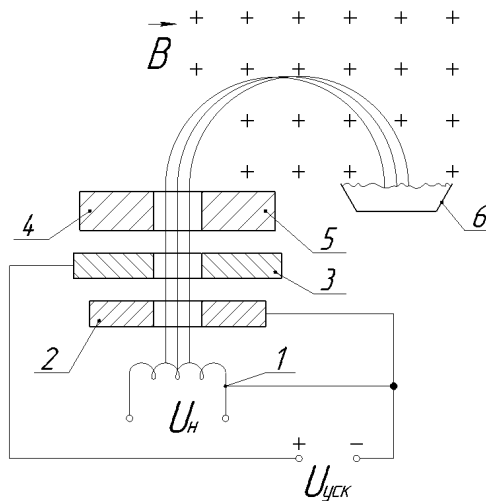


Рис. 18.11. Фокусировка пучка электронов в электронной пушке

18.9. Лазерный нагрев

Лазерный нагрев является самым чистым способом разогрева испаряемого материала, который осуществляется в результате поглощения распыляемым веществом энергии квантов электромагнитного поля. Источником энергии является непрерывный лазер 1 (рис. 18.12) на CO_2 , который размещается вне вакуумной камеры.

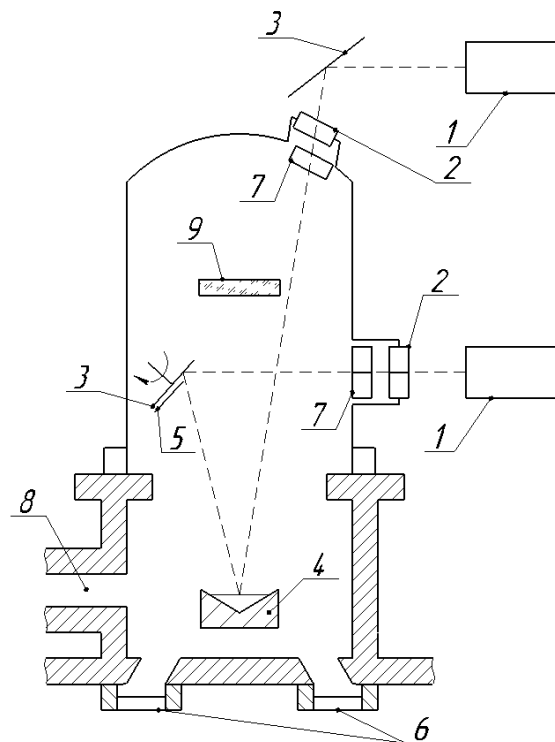


Рис. 18.12. Вакуумная установка с лазерным испарителем

На рис. 18.12 показаны два варианта размещения лазеров. Излучение проникает в камеру через прозрачное окно 2 и с помощью зеркала 3 попадает на испаряемое вещество, находящееся в тигле 4. При необходимости

зеркало может поворачиваться вокруг оси. Поверхность зеркала защищена диафрагмой 5. Контроль толщины слоев ведется по отражению через отверстие 6. Экран 7 из каменной соли защищает окно от попадания молекул испаряемого вещества. Переходник 8 соединяет камеру с вакуумными насосами. Подложки 9 размещают над тиглем.

Длина волны излучения лазеров на CO_2 лежит в области поглощения материалов SiO , ZnS , ZnSe , PbF_2 , Na_3AlF_6 , SiO_2 , MgF_2 , Si_3N_4 , LaAlO_3 , TiO_2 , Al_2O_3 , которые приведены в порядке возрастания сложности их испарения.

Кроме высокой чистоты получаемых покрытий, обусловленной способом нагрева вещества, преимуществом рассматриваемого метода является отсутствие электрических зарядов на подложке и, как следствие, отсутствие пыли в слоях. Помимо этого при лазерном и электронно-лучевом нагреве происходит меньшее перемешивание расплава, что способствует тождественности стехиометрического состава распыляемого материала и покрытия. При лазерном нагреве следует использовать фильтры скоростей частиц испаряемого материала, поскольку выброс высокоэнергетичных частиц приводит к рассеянию излучения в слоях.

Качество наносимых покрытий в значительной мере определяется качеством исходных материалов. Основными являются следующие свойства распыляемых веществ: чистота, содержание газов, размер зерен. Использование прокаленных и обезгаженных в вакууме материалов или кусков монокристаллов позволяет избавиться от интенсивного газоотделения и разбрызгивания вещества из испарителя во время испарения. По этой же причине не рекомендуется распылять вещества в виде порошков, которые всегда сильно поглощают газы.

Иногда на поверхности фторидов образуются слои окислов или карбонатов, которые препятствуют испарению, что может привести к внезапному выбрасыванию вещества из лодочки.

Основными преимуществами метода термического распыления материалов являются:

возможность получения равнотолщинных покрытий на подложках произвольной формы;

возможность получения покрытий из разнообразных материалов: металлов, диэлектриков, полупроводников;

возможность получения покрытий произвольного, сколь угодно сложного состава;

возможность контроля оптических констант слоев в процессе нанесения; сравнительная простота метода.

Недостатками метода можно считать:

– невозможность получения покрытий без мелких отверстий («проколов»);

– невысокую механическую прочность слоев, большинство из которых требует защиты;

– невозможность, из-за низкой механической прочности, получения толстых (более 1 мкм) слоев.

Глава 19. ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

19.1. Сущность ионно-плазменного нанесения покрытий

Основой ионно-плазменной обработки является взаимодействие с поверхностью твердого тела ионов и других энергетических частиц, которые возникают в низкотемпературной плазме. Это взаимодействие осуществляется в разреженной среде. В результате на подложку наносится пленка из частиц удаленного вещества и, кроме того, возникает преобразованная благодаря бомбардировке поверхность. Использование ионов при бомбардировке дает возможность управлять их движением. Высокоэнергетичные ионы при столкновении с поверхностью материала расплывают его. Взаимодействие бомбардирующих частиц с мишенью осуществляется в поверхностном слое толщиной в несколько нанометров. Эффективность взаимодействия слабо зависит от того, заряжена частица или нет, и определяется ее энергией – кинетической или потенциальной.

Процессы ионно-плазменной обработки систематизируют по двум признакам: по природе взаимодействия энергетических частиц плазмы с материалами (физическое или химическое) и способу осуществления взаимодействия (ионное или плазменное). При физическом взаимодействии имеет место обмен энергией и импульсом между упругосталкивающимися частицами. Столкновение с высокоэнергетичным ионом может привести к разрыву связей атома материала с другими атомами и, как следствие, к расплывлению атома. При химическом взаимодействии имеет место обмен электронами между атомами при их неупругом столкновении, что приводит к химическим превращениям обрабатываемого материала. В этом случае могут расплываться соединения атома материала с атомами энергетических частиц. Часто невозможно четко разделить кинетику физического и химического взаимодействий, однако всегда можно выделить преимущественный механизм.

Технологические характеристики ионно-плазменной обработки определяют способ осуществления взаимодействия. В случае когда обрабатываемый материал помещается в плазму или, находясь в непосредственной близости от нее, подвергается воздействию всего набора частиц плазмы, а также УФ- и тепловому облучению, имеет место плазменная обработка. При ионной обработке расплываемый материал находится вне плазмы и бомбардируется только ионами, отбираемыми из плазмы.

Различные способы ионно-плазменной обработки осуществляются при разных давлениях в рабочих камерах: плазменные – при более высоких, ионные – при более низких.

На рис. 19.1 приведены принципиальные схемы устройств, используемых при нанесении покрытий: *а* – устройство катодного распыления; *б* – триодная система; *в* – устройство магнетронного распыления.

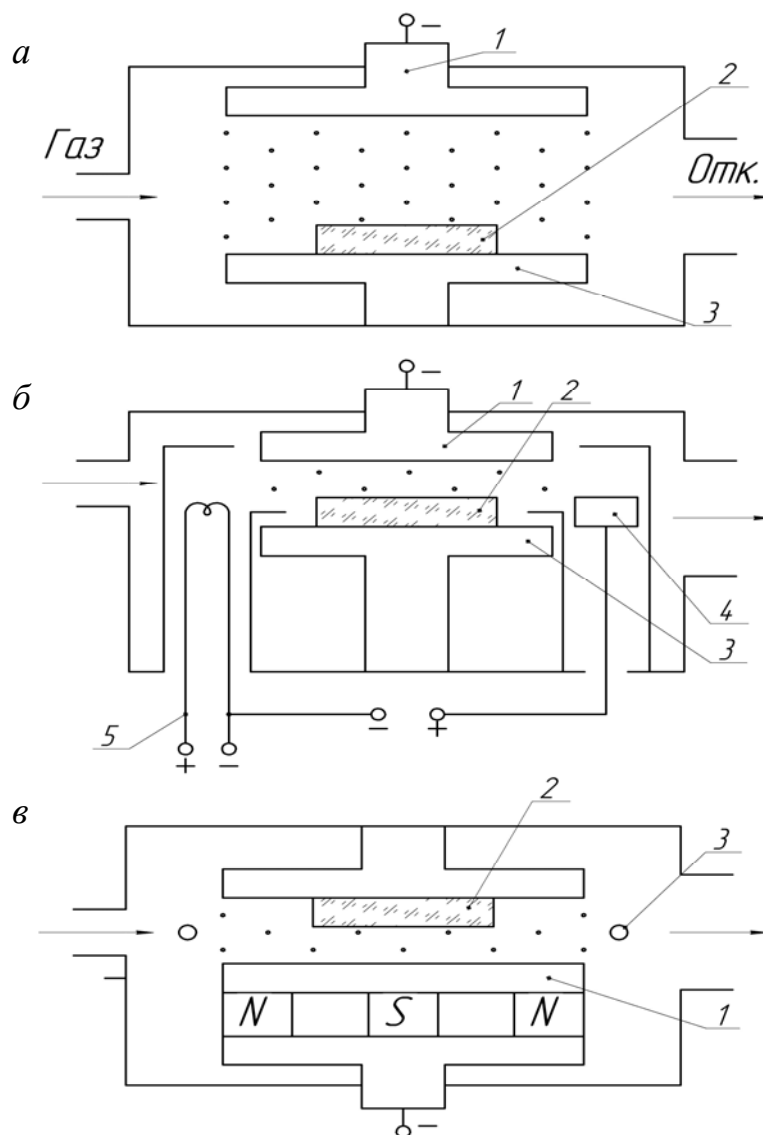


Рис. 19.1. Схемы устройств, используемых при нанесении покрытий

Рассмотрим работу устройств на примере системы катодного распыления (рис. 19.1, *а*). Между катодом 1, играющим роль распыляемой мишени, и анодом 3, на котором расположена подложка 2, создается высокое падение напряжения, в результате чего зажигается тлеющий разряд. Возникающие в разряде положительные ионы ускоряются полем и бомбардируют катод, с которого распыляются частицы материала. Температура анода и катода в результате бомбардировки может достигать тысячи градусов. В связи с этим рассматриваемое устройство используют для получения металлических пленок, а также пленок окислов. Распыление диэлектриков этим методом затруднено, поскольку подать на изолированную поверхность электрический потенциал нельзя. Для получения диэлектриче-

ских пленок используется переменное высокочастотное напряжение, которое прикладывается между катодом и заземленным анодом. Электроны, как более легкие по сравнению с ионами частицы, осциллируют в переменном электрическом поле и создают отрицательное по отношению к плазме смещение на поверхности диэлектрика. В результате наблюдается распыление диэлектрика положительными ионами.

Предварительно установка должна быть откачана до давления 10^{-5} – 10^{-6} Па. Введение дополнительных накаливаемого катода 5, эмитирующего электроны, и анода 4 (рис. 19.1, б) позволяет снизить давление рабочего газа до $(5-6) \cdot 10^{-2}$ Па. Электрическое поле между дополнительными электродами подает электроны в зону распыления.

Наибольшая скорость нанесения достигается в устройстве магнетронного распыления (рис. 19.1, в). Увеличения плотности потока бомбардирующих ионов добиваются с помощью скрещенных электрического и магнитного полей, удерживающих электроны в зоне разряда у поверхности распыляемого катода. Замкнутое магнитное поле создается постоянными магнитами, расположенными под катодом.

Контроль толщины наносимых слоев в описанных устройствах при нанесении оптических покрытий в большинстве случаев осуществляется интерференционным методом.

Равнотолщинности слоев на больших площадях достигают, применяя планетарное вращение подложек и используя расположенные параллельно подложке катоды, размеры которых должны быть не меньше размеров напыляемых поверхностей. Кроме того, в процессе нанесения покрытий давление рабочего газа в камере необходимо поддерживать неизменным.

19.2. Взаимодействие энергетических ионов с материалом

19.2.1. Внедрение высокоэнергетических ионов в материалы

Проанализируем закономерности процесса физического взаимодействия при бомбардировке материалов ионами инертных газов. Высокоэнергетичный ион, внедряясь в поверхность материала, претерпевает упругие и неупругие столкновения с ядрами и электронами атомов, что приводит к смещениям и возбуждениям атомов.

При этом возможно отражение бомбардирующих ионов в любом зарядовом состоянии. Точно так же в любом зарядовом состоянии может находиться распыленный атом (A^+ , A^- , A^0). Кроме того, наблюдаются вторичная электронная эмиссия и электромагнитное излучение со спектром, простирающимся от ИК- до рентгеновского диапазона. В состав распыленных частиц могут входить кластеры. Следует отметить, что 90 % энергии бомбардирующих ионов расходуется на разогрев бомбардируемого материала.

При упругих столкновениях (ядерное торможение) ион теряет энергию дискретно, при неупругих (электронное торможение) кинетическая энергия

взаимодействующих частиц уменьшается в результате ее превращения во внутреннюю энергию атомов. В результате неупругих столкновений возникают вторичная электронная эмиссия, электромагнитное излучение, зарядка распыленных частиц материала, перезарядка обратнорассеянных ионов. Из-за большого числа столкновений ионов с электронами процесс торможения можно считать сопровождающимся непрерывной потерей энергии. Ядерное торможение преобладает при низких энергиях ионов, электронное – при высоких. При ионно-плазменной обработке энергия ионов преимущественно соответствует ядерному торможению.

19.2.2. Ионное распыление

Ионное распыление – это физическое распыление материала в результате взаимодействия с высокоэнергетичным ионом. При внедрении иона возникает каскад бинарных упругих столкновений смещенных атомов катода, что приводит к обмену энергией и импульсами между атомами. Каскад развивается за время порядка $2 \cdot 10^{-13}$ с. Вероятность возникновения каскада столкновений велика, если масса иона близка или больше массы атома материала. Каскад столкновений может закончиться передачей поверхностному атому импульса необходимой направленности и энергии, достаточной для выхода его на поверхность. Если начало каскада находится глубоко, то энергия, переданная атомам материала, может оказаться недостаточной для выхода атома на поверхность. Интенсивность процесса распыления определяется энергией ионов. Процесс наблюдается лишь в том случае, когда энергия бомбардирующего иона W_0 превышает некоторое пороговое значение $W_{\text{пор}}$, зависящее от относительных атомных масс бомбардирующего иона M_1 и атома материала M_2 .

Различные компоненты сложного по составу материала имеют разную распыляемость. Кинетическая энергия бомбардирующего иона распределяется между ними неравномерно, что приводит к преимущественному распылению некоторого компонента до количества, компенсирующего различие в скоростях распыления отдельных компонентов. Происходит изменение стехиометрического состава распыляемой поверхности. Стехиометрический состав распыленного потока в начальный момент в связи с этим также не соответствует стехиометрическому составу распыляемого материала. Однако если температура материала поддерживается невысокой и поступлений испаренной компоненты из глубинных слоев не происходит, то далее испаряются более тяжело распыляемые компоненты. Со временем стехиометрический состав распыляемого материала в потоке становится тождественным составу распыляемого материала. Распыление компонентов происходит со скоростями, пропорциональными их объемным концентрациям в материале. Изменение энергии бомбардирующих ионов приводит к изменению времени установления равновесного потока. Возможность

переносить на подложку сложный состав распыляемой мишени без изменения стехиометрии материала является одним из основных достоинств ионно-плазменного распыления.

Распыляемым частицам свойственно определенное пространственное распределение, зависящее от энергии бомбардирующих ионов (рис. 19.2).

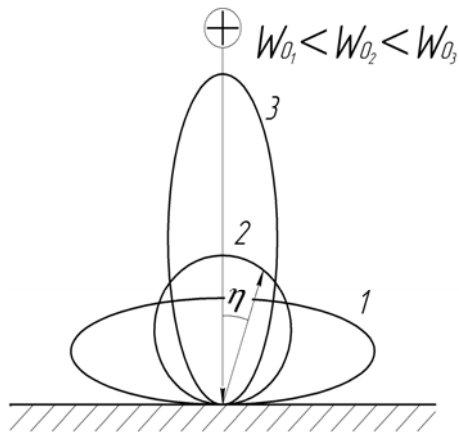


Рис. 19.2. Пространственное распределение распыляемых частиц

малых энергиях бомбардирующих ионов происходит так называемое подкосинусное распределение (кривая 1). С ростом W_0 вид пространственного распределения изменяется от подкосинусного до надкосинусного (кривая 3). Объясняется это тем, что при малых энергиях ионов атомы выбиваются из неглубокого приповерхностного слоя. В этом случае наибольшую вероятность распыления имеют атомы, получившие импульс, направленный наклонно к поверхности. При больших энергиях глубина проникновения велика и максимальную вероятность распыления имеют атомы в каскадах, развивающихся в направлениях кратчайшего расстояния до поверхности.

Энергия большинства распыленных атомов составляет несколько электронвольт. Этот факт объясняется существованием высокоэнергетичного «хвоста» распыления.

19.2.3. Механизм ионного распыления

Существуют три основных механизма распыления материалов. Согласно одному из них распыление является результатом каскада упругих столкновений смещенных из равновесных состояний атомов. Смещения обусловлены передачей бомбардирующим ионом энергии и импульса атомам материала.

Другой механизм объясняет распыление материалов сильным локальным разогревом поверхности материала в месте падения иона. Существуют две тепловые модели: «горячего пятна» и «теплого клина». Первая модель предполагает, что энергия бомбардирующего иона выделяется в малой области порядка нескольких атомных радиусов вблизи места удара иона. Температура этой области резко возрастает, что приводит к испаре-

нию атомов. Согласно второй модели локальный разогрев создается вторичными быстрыми частицами, образующимися при взаимодействии ионов с атомами материала. Первичный смещенный атом, двигаясь в материале, быстро «остывает», т. е. теряет энергию, передавая ее соседним атомам. Размер теплового клина – порядка 10^{-6} см.

В результате локального разогрева может происходить химическое разложение бомбардируемого материала (третий механизм). Этим можно объяснить некоторые особенности распыления высокомолекулярных органических материалов.

Вышеприведенные механизмы в той или иной мере объясняют наблюдаемые закономерности ионного распыления. Теоретически можно объяснить распыление простых материалов. Что же касается сложных материалов, то применение вышеупомянутых теорий в этом случае ограничено.

Основное влияние на процесс распыления оказывают давление и состав газов в камере. Столкновения распыленных частиц с атомами остаточных газов могут привести к их отражению (возврату) на распыляемую поверхность. Это является основным недостатком при распылении на постоянном токе, происходящем при высоком давлении остаточных газов. В результате 90 % общего числа распыленных частиц возвращается на распыляемую поверхность, что приводит к падению скорости распыления.

Сильное влияние на процесс ионного распыления оказывают химически активные остаточные газы. Хемосорбция и адсорбция снижают распыляемость материалов; первая – за счет увеличения энергии связи, вторая – за счет увеличения количества удаляемого материала. Присутствие в атмосфере камеры кислорода, как правило, уменьшает распыляемость материалов. Кроме того, при этом наблюдается распыление окислов бомбардируемого материала. Регулируя давление кислорода в камере, можно повысить избирательность физического процесса ионного распыления одних материалов по отношению к другим.

19.3. Формирование покрытий в процессе ионно-плазменного и ионно-лучевого нанесения

19.3.1. Характеристика и этапы ионно-плазменного нанесения

Процесс ионно-плазменного нанесения можно разделить на три этапа: распыление материала мишени, перенос распыляемого материала в пространстве мишень–подложка, осаждение материала на подложке.

Формирование пленок в процессе ионно-плазменного нанесения происходит в более сложных условиях, чем в процессе ионно-лучевого нанесения. Остановимся на первом процессе, рассматривая второй как идеализацию первого.

На процесс ионно-плазменного распыления оказывают влияние устройства, используемые для распыления материалов.

В зависимости от вида используемого рабочего газа и условий осаждения пленок на подложках различают геттерное, реактивные ионно-плазменное и ионно-лучевое нанесение (ионное осаждение).

Высокая энергия распыляемых частиц в случае ионно-плазменного распыления позволяет им внедряться в подложку, что обеспечивает высокую адгезионную прочность покрытий. Этому также содействует рост переходных окисных слоев, образующихся благодаря присутствию химически активных газов. Высокая энергия распыляемых частиц, кроме того, снижает минимальную температуру эпитаксиального роста слоев материалов и повышает плотность покрытий.

Скорость нанесения v_n слоя

$$v_n = \frac{v_p}{S} \beta_{\text{п}} \int \alpha_{\text{п}} dS,$$

где v_p – скорость распыления материала, нм/с;

$\beta_{\text{п}}$ – коэффициент прилипания распыляемых частиц к подложке;

$\alpha_{\text{п}}$ – вероятность поступления распыляемых с элемента поверхности мишени dS частиц на подложку;

S – площадь распыляемой мишени, см^2 .

В свою очередь, как отмечалось, v_p зависит от энергии и распределения по энергиям бомбардирующих ионов. Существует оптимальное давление газа в камере, при котором достигается самая высокая скорость нанесения v_n (тождественна v_k – скорости конденсации).

В настоящий момент не существует ясной картины процесса формирования покрытий при ионно-плазменном нанесении. Условия роста пленок в этом случае значительно сложнее условий их роста при вакуумном распылении материалов.

Высокое давление рабочего газа при ионно-плазменном нанесении, а также высокая активность поверхности растущей пленки приводят к загрязнению покрытий в результате поглощения ими примесей из окружающей атмосферы. Загрязнение покрытий может быть обусловлено присутствием в рабочей камере паров масла из насосов.

Уменьшить загрязнение покрытий при относительно низком вакууме (10^{-2} Па) позволяет прием, названный геттерным распылением. Он заключается в следующем. В установке размещается два катода K (рис. 19.3).

Подложка Π закрепляется на заземленном аноде A , который делит камеру на две части (1 и 2). Рабочий газ попадает в первую часть камеры, где геттерирующая пленка замуровывает находящиеся в нем примеси. Очищенный газ попадает во вторую часть камеры, где и происходит нанесение слоя. Недостатком метода является распыление из-за потерь в первой части камеры значительно большего количества материала, чем это необходимо для получения нужной толщины покрытия.

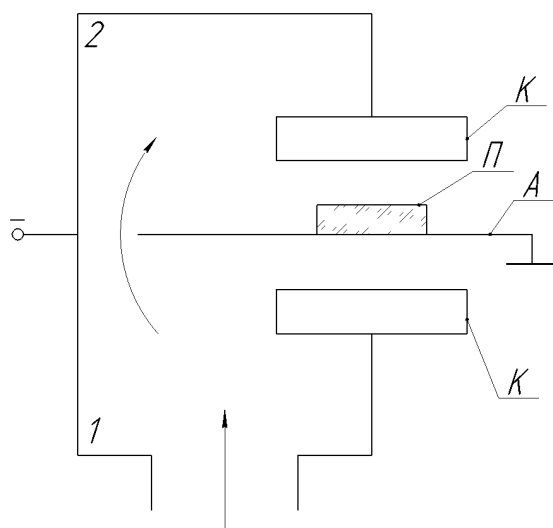


Рис. 19.3. Схема геттерного распыления материала

19.3.2. Реактивное ионно-лучевое и ионно-плазменное нанесение покрытий

При реактивном нанесении покрытий используется чувствительность состава напыленных покрытий к составу газовой среды и давлению газа. С целью изменения состава покрытий в рабочий газ специально добавляются определенные реактивные газы. При нанесении также используются эффекты повышения химической активности молекул реактивного газа в разряде и энергетической активации осаждаемой поверхности. В рассматриваемом случае нанесения покрытий по крайней мере один из компонентов покрытия вводится в рабочую камеру в виде газа.

На рис. 19.4 приведена схема формирования на подложке 1 окисной пленки металла М при распылении металлической мишени 2.

Место образования окисла определяется интенсивностью распыления мишени, скоростью осаждения, парциальным давлением реактивного газа и температурой подложки. Если окисел и образуется на мишени, то воздействие высокоэнергетичного иона приведет к его фрагментации на атомы. (Перенос вещества в виде молекул возможен только в случае прочных внутримолекулярных связей). Следует заметить, что образование соединений на мишени способствует получению покрытий с более стехиометричным составом.

При высокой скорости распыления химические соединения на мишени образовываться не успевают. Не будут они образовываться и в процессе переноса при низких плотностях потока распыляемого материала и молекул реактивного газа. Наиболее вероятно образование соединений непо-

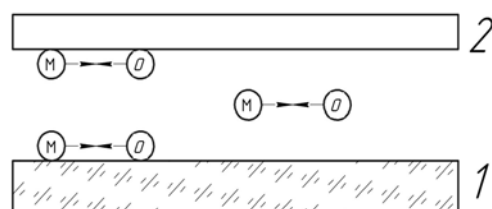


Рис. 19.4. Схема формирования окисной пленки при распылении металлической мишени

средственно на подложке. Интенсивность окисления осаждающего материала зависит от химической активности и плотности потоков реактивного газа и частиц распыляемого материала. Стехиометрия пленок зависит от температуры подложки. Высокие скорости нанесения и низкие температуры подложек отрицательно сказываются на качестве покрытия. Наиболее благоприятны температура 300–500 К и умеренные скорости нанесения.

19.3.3. Ионное осаждение

Ионное осаждение занимает промежуточное положение между вакуумным распылением и ионно-плазменным нанесением. При ионном осаждении пленка напыляется в вакууме, но, в отличие от вакуумного распыления, процесс конденсации материала на подложке сопровождается воздействием на образующееся покрытие ионов газа или ионов распыляемого материала. Поток конденсируемого материала может быть создан с помощью добавочной мишени, не связанной с мишенью, обеспечивающей ионную бомбардировку в случае, когда ионное осаждение производится на основе ионно-плазменного нанесения. В случае же ионного осаждения на основе вакуумного распыления на подложку подается отрицательный потенциал (до 300 В), что обеспечивает ее интенсивную ионную бомбардировку. Плазма разряда в этом случае используется для получения потока конденсируемого материала и потока ионов. Ионное осаждение может носить реактивный характер.

Основной особенностью процесса ионного осаждения является постоянная энергетическая активация поверхности растущей пленки. Изменяя энергию и число бомбардирующих ионов, можно регулировать кинетику роста пленки. Следует заметить, что бомбардировка оптических диэлектрических пленок иногда приводит к снижению их качества.

Литература к разделу 2

1. Розенберг, Г. В. Оптика тонкослойных покрытий / Г. В. Розенберг. – М. : Физматгиз, 1958. – 547 с.
2. Крылова, Т. Н. Интерференционные покрытия / Т. Н. Крылова. – Л. : Машиностроение, 1973. – 224 с.
3. Физика тонких пленок : в 8 т. / под ред. Г. Хасса, Р. Э. Туна. – М. : Мир, 1968. – Т. 3. – 331 с.
4. Физика тонких пленок : в 8 т. / под ред. Г. Хасса, М. Франкомба, Р. Гофмана. – М. : Мир, 1978. – Т. 8. – 359 с.
5. Физика тонких пленок : в 8 т. / под ред. М. Франкомба, Р. Гофмана. – М. : Мир, 1973. – Т. 6. – 392 с.
6. Физика тонких пленок : в 8 т. / под ред. Г. Хасса, Р. Э. Туна. – М. : Мир, 1972. – Т. 5. – 344 с.

7. Ивановский Г. Ф. Ионно-плазменная обработка материалов / Г. Ф. Ивановский, В. И. Петров. – М. : Радио и связь, 1986. – 231 с.
8. Технология тонких пленок : справочник : в 2 т. / под ред. Л. Майсела, Р. Глэнга. – М. : Советское радио, 1977. – Т. 1. – 662 с.
9. Точицкий, Э. И. Кристаллизация и термообработка тонких пленок / Э. И. Точицкий. – Минск : Наука и техника, 1976. – 376 с.
10. Рост кристаллов : в 2 т. / под ред. К. Гудмона. – М. : Мир, 1977. – Т. 1. – 362 с.
11. Рост кристаллов : в 2 т. / под ред. К. Гудмона. – М. : Мир, 1981. – Т. 2. – 223 с.
12. Палатник, Л. С. Механизм образования и субструктуроконденсированных пленок / Л. С. Палатник, М. Я. Фукс, В. М. Косевич. – М. : Наука, 1972. – 320 с.
13. Палатник, Л. С. Эпитаксиальные пленки / Л. С. Палатник, И. И. Папилов. – М. : Наука, 1971. – 480 с.
14. Палатник, Л. С. Поры в пленках / Л. С. Палатник, П. Г. Черемской, М. Я. Фукс. – М. : Энергоиздат, 1982. – 215 с.
15. Стрикленд-Констэбл, Р. Ф. Кинетика и механизм кристаллизации / Р. Ф. Стрикленд-Констэбл. – Л. : Недра, 1971. – 310 с.
16. Дерягин, Б. В. Адгезия твердых тел / Б. В. Дерягин, Н. А. Крылова, В. П. Смилга. – М. : Наука, 1973. – 279 с.
17. Суйковская, Н. В. Химические методы получения тонких прозрачных пленок / Н. В. Суйковская. – Л. : Химия, 1976. – 199 с.
18. Справочник технолога-оптика / под ред. С. М. Кузнецова, М. А. Окатова. – Л. : Машиностроение, 1983. – 414 с.
19. Френкель, Я. И. Собрание избранных трудов : в 2 т. / Я. И. Френкель. – М.-Л. : АН СССР, 1958. – Т. 2. – 600 с.
20. Авришин, В. В. Неразрушающий контроль параметров тонких проводящих пленок электромагнитными методами / В. В. Авришин; Латв. академия наук ; Физико-энергетический ин-т. – Рига : Зинатне, 1991. – 206 с.
21. Барышнекова, М. В. Кинетические закономерности осаждения тонких пленок диоксида титана из газовой фазы / М. В. Барышнекова // Журнал общей химии. – 2013. – Т. 83, Вып. 8. – С. 1367–1371.
22. Получение, электрофизические и оптические свойства пленок // Неорганические материалы / З. У. Дисабуга [и др.]; Гл. академия наук; отделение химии и наук о материалах. – 2014. – Т. 50, № 4. – С. 358–361.
23. Берлин, Е. В. Получение тонких пленок реактивным магнетронным распылением / Е. В. Берлин, Л. А. Сейдман. – М. : Техносфера, 2016. – 255 с.

Раздел 3

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Глава 20. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕТАЛЛА И ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ИХ КОНСТРУКЦИИ

20.1. Структура технологического процесса изготовления деталей

Основными элементами технологического процесса являются технологическая операция, установ, технологический переход, рабочий ход, вспомогательный ход.

Технологическая операция является основной единицей производственного планирования. С ее помощью определяют:

- 1) нормы времени и расценки;
- 2) требуемое количество рабочих, оборудования, приспособлений, инструментов;
- 3) себестоимость обработки.

В случае использования обычных станков технологические переходы осуществляются при неизменных режимах их работы. В станках с программным управлением внутри одного технологического перехода может происходить автоматическое изменение режимов обработки.

Рабочий ход – перемещение инструмента относительно заготовки, которое сопровождается изменением формы и размеров последней.

Вспомогательный ход – перемещение инструмента относительно заготовки, которое не сопровождается изменением размеров и формы, но необходимого для подготовки рабочего хода.

20.2. Свойства технологических процессов

Основными показателями технологического процесса являются технические, экономические, эргономические и эстетические, а также безопасность.

Технические:

- 1) точность;
- 2) стабильность;
- 3) надежность;
- 4) уровень автоматизации;
- 5) контролируемость;
- 6) процент выхода готовой продукции;
- 7) патентная чистота.

Экономические:

- 1) материалоемкость;
- 2) металлоемкость;
- 3) энергоемкость;
- 4) производительность.

Эргономические и эстетические:

- 1) удобство обслуживания станка;
- 2) гигиеничность.

Безопасность:

- 1) уровень токсичности;
- 2) уровень шума;
- 3) взрывобезопасность;
- 4) степень загрязнения окружающей среды;
- 5) пожаробезопасность.

20.3. Технологическая подготовка производства

Технологическая подготовка производства включает:

- 1) подбор типового технологического процесса;
- 2) выбор исходной заготовки и методов ее получения;
- 3) составление технологического маршрута;
- 4) разработку технологических операций;
- 5) выбор средств механизации и автоматизации, а также внутрицеховых средств транспортирования;
- 6) расчет режимов обработки;
- 7) нормирование технологического процесса (определение стоимости работ);
- 8) определение требований техники безопасности и экологии;
- 9) оформление технологической документации.

20.4. Виды технологичности

Различают производственную и эксплуатационную технологичность.

Производственная технологичность призвана сократить средства и время на подготовку производства и процесс изготовления прибора (в том числе контроля и испытаний).

Эксплуатационная технологичность должна обеспечить сокращение времени и средств на техническое обслуживание прибора и его ремонт.

Повышением технологичности конструкции можно увеличить выпуск продукции при тех же средствах производства. Недооценка технологичности конструкции часто приводит к необходимости корректирования рабочих чертежей после их составления, а также к удлинению сроков подготовки производства.

Конструкция приборов должна быть удобной для обслуживания и ремонтпригодной, так как затраты на все виды ремонта часто превышают затраты на изготовление новых изделий. Повышение ремонтпригодности изделия обеспечивается легкостью и удобством сборки и разборки, а также возможностью замены узлов и восстановления наиболее сложных деталей.

20.5. Стадии технологичности

При проектировании прибора различают стадии эскизного проекта, технического проекта и разработки технической документации.

При отработке технологичности конструкции прибора на стадии *эскизного проекта* производят:

- 1) выбор наиболее простой принципиальной схемы;
- 2) выбор базовой конструкции, которая должна быть положена в основу проектируемого прибора;
- 3) разбивку прибора на самостоятельные сборочные единицы;
- 4) обеспечение технологичности оригинальных вновь разрабатываемых деталей и выбор рациональных заготовок для них.

На стадии *технического проекта* определяют конструкцию прибора в целом и форму всех его деталей. Кроме того, на этой стадии решаются основные вопросы технологичности всех заготовок.

На стадии *разработки рабочей документации* проводят доработку чертежей по вопросам технологичности конструкции каждой детали и прибора в целом, при этом особое внимание обращается:

- 1) на проверку правильности простановки размеров и назначения оптимальных допусков, а также удовлетворения требований ТУ и производственных требований;
- 2) выбор наиболее дешевых и недефицитных материалов;
- 3) проверку соблюдения требований, предъявляемых к оформлению отдельных элементов конструкции заготовок (толщина стенок, радиусы переходов, уклоны, линии разъема и т. п.);
- 4) проверку соблюдения требований, предъявляемых к технологичности деталей при их механической обработке (доступ к местам обработки, наличие надежных поверхностей для крепления деталей на станке и т. д.);
- 5) сокращение разнообразия таких имеющих одинаковое функциональное назначение элементов конструкции, как диаметры, резьбы, шлицевые соединения, модули зубьев зубчатых колес и т. п. (унификация).

20.6. Общие требования к технологичности конструкции деталей

Конфигурация детали должна представлять собой сочетание простых геометрических форм, позволяющих применить высокопроизводитель-

ные технологические процессы, желательно на имеющемся оборудовании, а также предусматривать удобную и надежную базу для установки заготовки в процессе ее обработки.

Заданные точность и шероховатость поверхности детали должны быть обоснованы ее служебным назначением. Завышенные требования к точности и шероховатости вынуждают вводить дополнительные операции, удлиняют процесс обработки и увеличивают его трудоемкость, что в конечном итоге повышает себестоимость прибора.

Технологичность конструкции детали – понятие относительное. Для одной и той же детали она будет разной для различных типов производства. Технологичная деталь в единичном производстве может быть малотехнологичной в поточном и совершенно нетехнологичной в автоматизированном производстве.

Отработку на технологичность в конструкции детали следует производить не только в целях упрощения механической обработки, но и с учетом выполнения заготовительных процессов, а также сборки и ремонта, стремясь получить минимальную себестоимость и трудоемкость изготовления прибора в целом.

В крупносерийном и массовом производствах применение специального профильного проката сокращает, а часто даже исключает механическую обработку.

Следует избегать пересечений цилиндрических элементов заготовки между собой и цилиндрических элементов с призматическими.

Нежелательны конусообразные и клиновые формы. Детали сложной формы, не поддающиеся упрощению в цельном виде, целесообразно заменять сварными конструкциями из простых элементов.

При конструировании штампов, получаемых на прессах холодной обработки посредством давления, рекомендуется руководствоваться следующими основными указаниями:

1. Геометрическая форма заготовок должна обеспечивать возможность их свободного извлечения из штампа.
2. Боковые поверхности должны иметь уклоны.
3. Переходы от одной поверхности к другой необходимо осуществлять с закруглениями. Не допускать острых углов.
4. Конструкция заготовки должна допускать разъем штампов по плоскости (нежелателен разъем по ломаной линии или криволинейной поверхности).

При получении заготовок прессованием (горячей обработкой посредством давления, т. е. используется расплавленный металл) выступы и ребра на поверхности заготовки не должны быть близко расположены друг к другу, так как это затрудняет течение металла и заполнение полостей пресс-формы.

20.7. Общие требования к технологичности конструкции деталей при механической обработке

Общие требования, предъявляемые к конструкции деталей приборов с точки зрения эффективной механической обработки, следующие:

1. Сокращение объема механической обработки, уменьшение протяженности обрабатываемых поверхностей. Предусмотрение допусков только на размеры поверхностей сопряжения (рис. 20.1).

2. Обеспечение точных и надежных баз.

3. Обеспечение достаточной жесткости деталей.

4. Предусмотрение возможности удобного подвода инструмента к обрабатываемой поверхности.

5. Предусмотрение свободного выхода режущих инструментов при обработке на проход (рис. 20.2).

6. Предусмотрение возможности удобного контроля обрабатываемых заготовок.

7. Конструирование заготовок такой формы, чтобы их можно было бы обрабатывать по несколько штук (в пакете).

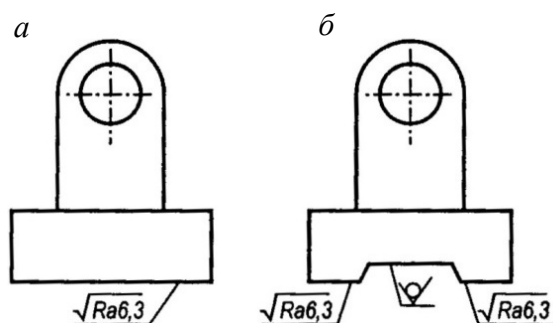


Рис. 20.1. Нетехнологичность (а) и технологичность (б) конструкции с точки зрения объема механической обработки

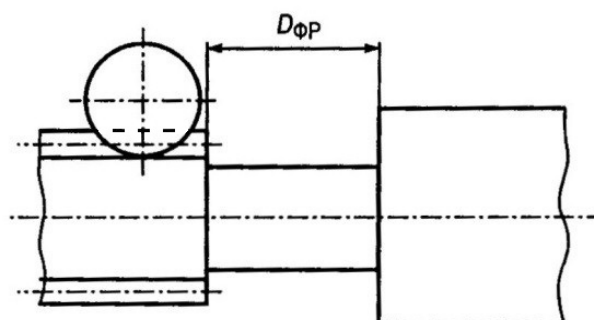


Рис. 20.2. Технологичность конструкции с точки зрения обеспечения свободного выхода инструмента

20.8. Технологические требования к элементарным поверхностям деталей приборов

20.8.1. Технологические требования к поверхностям. Общие положения

Ступенчатые поверхности должны иметь минимальный перепад диаметров. При больших перепадах используют составные конструкции для уменьшения объема обработки резанием и расхода металла. Не рекомендуется делать кольцевые канавки на торцах, особенно со стороны стержня (рис. 20.3, а), так как они трудоемки в обработке. Нежелательно предусматривать выступы, не вписывающиеся в контур поперечного сечения де-

тали (рис. 20.3, б). Элементы тел вращения унифицируют для использования одних и тех же наладок станка (рис. 23.3, в). Переходные поверхности рекомендуется заменять фасками (рис. 20.3, г). Сферические выпуклые поверхности делают со срезом перпендикулярно оси (рис. 20.3, д). В местах сопряжения точных поверхностей предусматривают проточку для выхода инструмента (рис. 20.3, е).

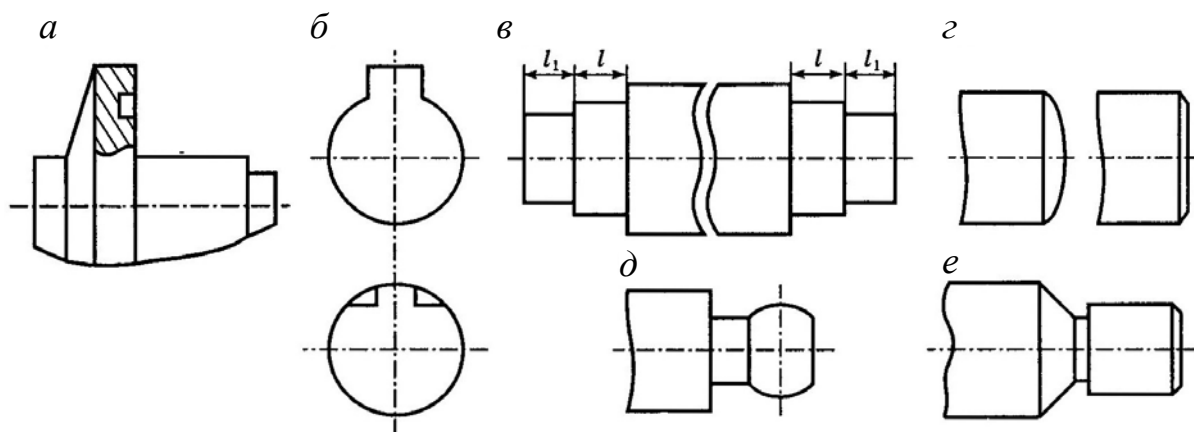


Рис. 20.3. Наружные поверхности вращения

20.8.2. Технологические требования к отверстиям

Во избежание поломки сверл поверхности на входе и выходе инструмента должны быть перпендикулярны оси отверстия (рис. 20.4).

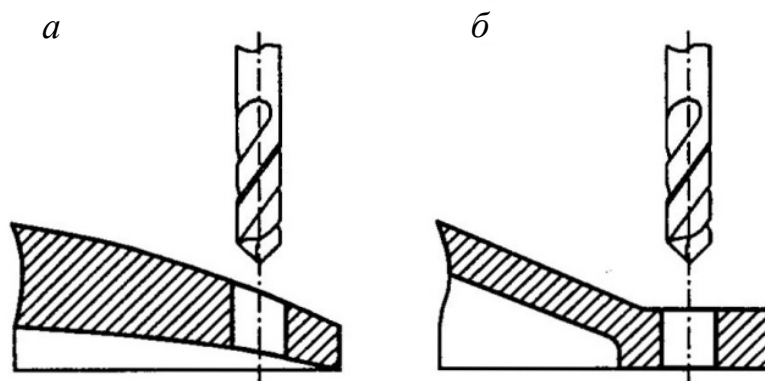


Рис. 20.4. Требования к расположению поверхностей отверстий

Желательно предусматривать сквозные отверстия, так как их обработка значительно легче обработки глухих отверстий. Расстояния между отверстиями следует назначать с учетом возможного применения многошпиндельных сверлильных головок.

Конструкция глухих отверстий должна быть увязана с конструкцией применяемого осевого инструмента, например, зенкера (рис. 20.5, *a*) или развертки (рис. 20.5, *б*).

Ось отверстия должна располагаться от вертикальной стенки детали на расстоянии

$$A \geq \frac{D}{2} + R,$$

а для отверстий под соединительные болты

$$A \geq \frac{D_r}{2} + R,$$

где D – диаметр отверстия;

D_r – диаметр описанной окружности гайки;

R – радиус переходной поверхности (рис. 20.6).

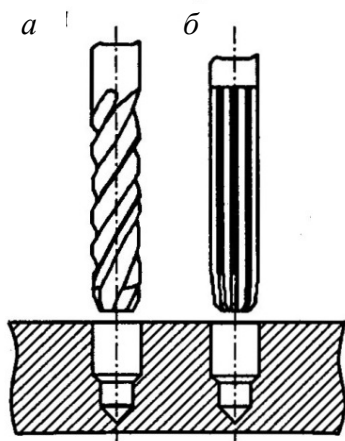


Рис. 20.5. Требования к технологичности глухих отверстий:
a – зенкерование; *б* – развертывание

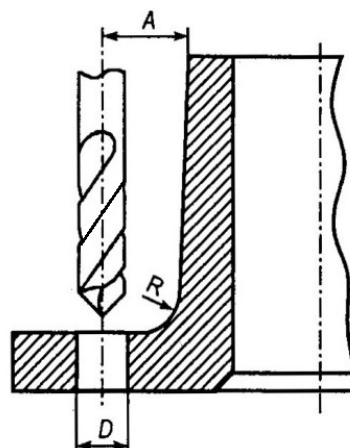


Рис. 20.6. Требования к технологичности расположения оси отверстий относительно вертикальной стенки заготовки

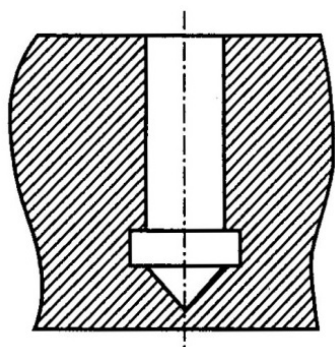


Рис. 20.7. Требования к технологичности конструкции глухих отверстий

При сверлении отверстий в пазах их диаметр следует назначать на 0,5–1,0 мм меньше ширины пазов.

У дна точных глухих отверстий, получаемых на токарном станке с помощью резца, предусматривают канавку для выхода инструмента (рис. 20.7).

Необходимо избегать отверстий с непараллельными осями (рис. 20.8), а также глухих отверстий, пересекающихся с внутренними полостями (предпочтительнее делать сквозное отверстие с заглушкой), рис. 20.9.

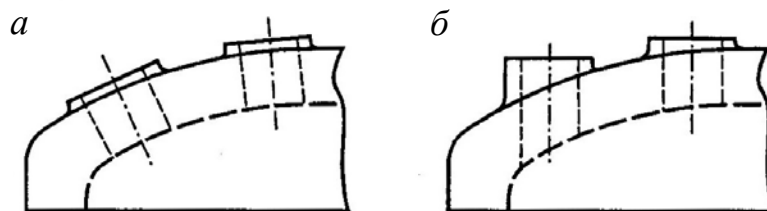


Рис. 20.8. Требования к технологичности расположения осей отверстий:
a – нетехнологично; *б* – технологично

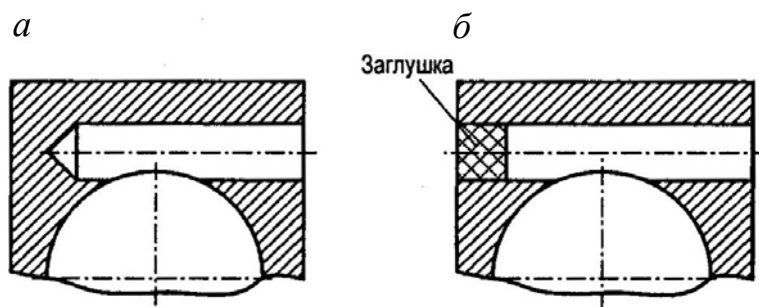


Рис. 20.9. Требования к технологичности пересекающихся отверстий:
a – нетехнологично; *б* – технологично

Цекование торцов отверстий лучше делать точением или фрезерованием (рис. 20.10).

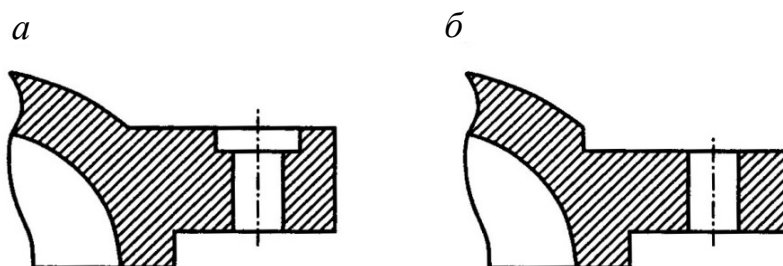


Рис. 20.10. Требования к технологичности цекуемых торцов отверстий:
a – нетехнологично; *б* – технологично

Надо избегать растачивания канавок в отверстиях, обрабатываемых на сверлильных станках, так как это усложняет обработку (рис. 20.11).

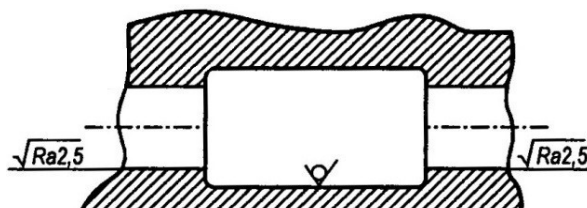


Рис. 20.11. Требования к технологичности канавок в отверстиях

20.8.3. Технологические требования к резьбе

1. На нарезаемом отверстии рекомендуется применять фаску для захода метчика (рис. 20.12).

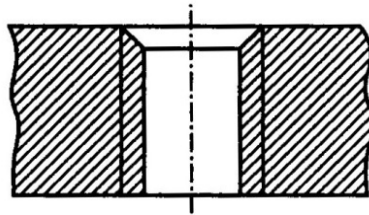


Рис. 20.12. Требования к технологичности заходной фаски на нарезаемом отверстии

2. Следует избегать применения резьб малого диаметра (до 6 мм) ввиду частой поломки метчиков в случае нарезания таких резьб на токарном станке.

3. Конструкция отверстия с резьбой должна давать возможность работать метчиком напроход (рис. 20.13).

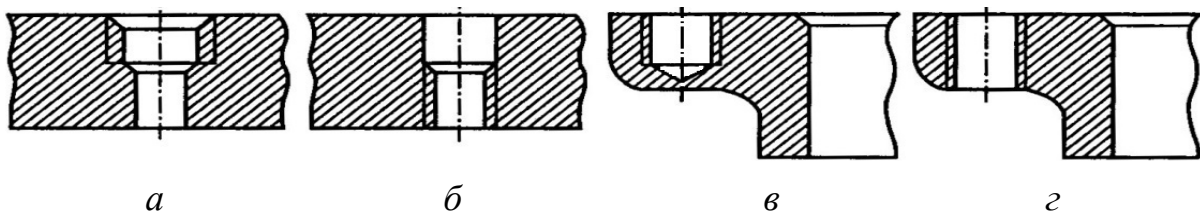


Рис. 20.13. Требования к технологичности резьб в отверстии:
а, в – нетехнологично; б, г – технологично

20.8.4. Технологические требования к плоскостям

1. Конфигурация обрабатываемых плоскостей должна обеспечивать безударную работу инструмента и соответствовать его форме (рис. 20.14, а и б).

2. Размеры обработанной плоскости (ширину) детали необходимо увязывать с нормальным рядом (стандартным инструментом) диаметров или длин фрез.

3. Площадки на деталях следует располагать на одном уровне (рис. 20.14, в). При этом необходимо избегать обработки закрытых площадок (внутри корпусных деталей).

4. Радиусы вогнутых поверхностей увязывать с диаметром нормальных концевых фрез (рис. 20.14, в).

5. Обрабатываемые плоскости желательно располагать выше примыкающих элементов (ребер, выступов), что позволяет реализовать обработку напроход (рис. 20.14, г).

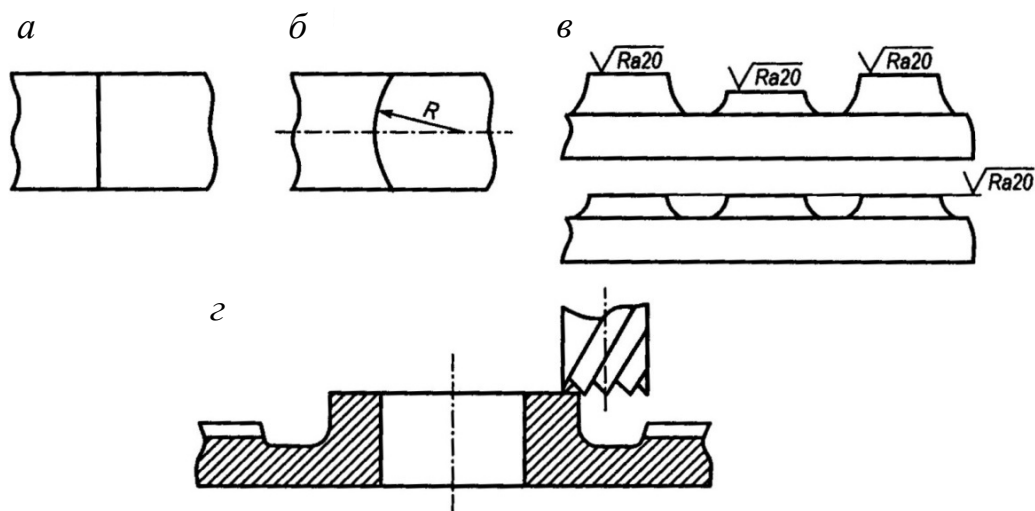


Рис. 20.14. Требования к технологичности конструкции плоских поверхностей при обработке плоскости напроход

6. Вогнутая сферическая поверхность должна предусматривать, если это допустимо, сквозное или глухое отверстие, чтобы при ее обработке не было нулевых скоростей резания (рис. 20.15).

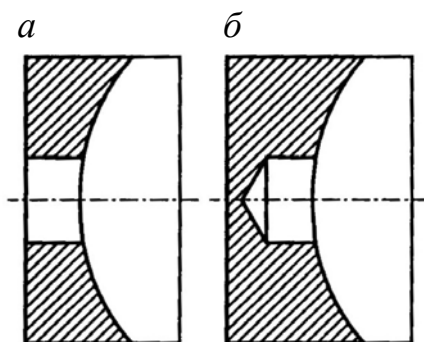


Рис. 20.15. Требования к технологичности конструкции вогнутой сферической формы:
а – сквозное отверстие; *б* – глухое отверстие

7. Пазы по возможности должны допускать обработку напроход.

8. Предпочтительны пазы, обрабатываемые дисковыми, а не концевыми фрезами (рис. 20.16).

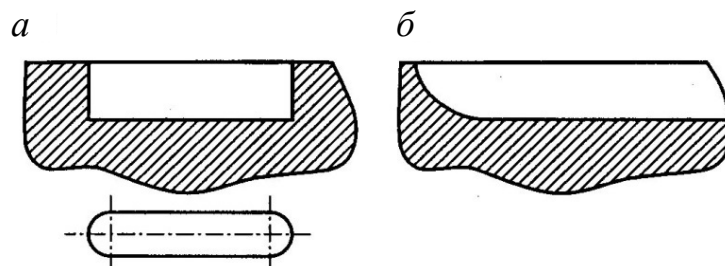


Рис. 20.16. Требования к технологичности формы пазов

9. Радиусы скруглений должны быть одинаковыми по всему контуру обрабатываемой поверхности и соответствовать размерам нормальных пазовых концевых фрез (рис. 20.17).

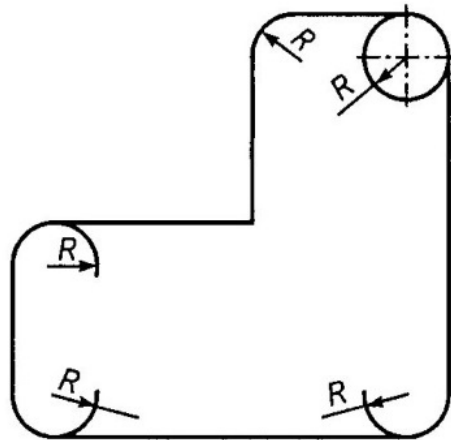


Рис. 20.17. Требования к технологичности радиуса скруглений у гнезд выемок

20.9. Общие требования к технологичности конструкции при термической обработке

1. Заготовки должны иметь простые геометрические формы и симметричную конфигурацию без острых граней, тонких перемычек и резких переходов от толстого сечения к тонкому.

2. На заготовках нежелательны прорезы, отверстия и канавки, в зоне которых при нагреве и охлаждении могут возникнуть напряжения и трещины.

3. Шероховатость поверхностей деталей, подвергаемых закалке, должна быть не ниже Ra 10 мкм, Rz 40 мкм. При термической обработке деталей с крупной шероховатостью и наличии дефектов (раковины и др.) возможно образование трещин и разрушение детали.

4. В заготовках, закаливаемых с помощью токов высокой частоты, толщина закаленного слоя должна быть больше глубины имеющихся выточек, иначе предел выносливости деталей снижается и они разрушаются по выточкам.

5. Следует избегать выхода закаленного слоя в слабую (нагруженную) зону детали. В этой зоне может произойти разрушение детали в результате суммирования напряжений, возникающих при ее работе, с напряжениями в закаленном слое.

20.10. Технологические особенности конструирования деталей из пластмасс и металлокерамики

Общие требования к технологичности конструкции деталей из пластмасс следующие.

1. Для легкого извлечения из пресс-форм детали из пластмасс должны иметь простую форму.

2. Разнотолщинность стенок (разностенность), допускаемая в конструкции детали, не должна быть более 30 %.

3. Острые углы в деталях заменяют плавными скруглениями. Это облегчает течение материала в пресс-форме, увеличивает прочность детали и устраняет опасность возникновения трещин из-за концентрации напряжений в острых углах.

4. Для повышения прочности детали и уменьшения ее коробления предусматривают ребра жесткости. Направление ребер должно совпадать с направлением прессования.

5. Точность размеров пластмассовых деталей назначается в пределах 12–14-го квалитетов, в отдельных случаях – до 11-го квалитета.

Общие требования к технологичности конструкции деталей из металлокерамики следующие.

1. Минимальная толщина стенки детали цилиндрической формы 1 мм, для деталей других типов 1,5 мм.

2. Различные утолщения, приливы, фланцы, канавки, углубления и выемки необходимо располагать в плоскости, перпендикулярной направлению прессования.

3. Следует предусматривать уклоны на стенках, перпендикулярных плоскости разъема пресс-форм.

Нельзя конструировать детали с узкими пазами и тонкими выступами, так как на этих элементах возможно появление дефектов.

Основной показатель качества деталей из металлокерамики – равномерная плотность их материала. Неравномерная плотность вызывает напряжения в материале, следствием чего могут быть коробление и растрескивание деталей.

Глава 21. ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ ДАВЛЕНИЕМ

21.1. Особенности процесса механической штамповки и конструкция штампов

Штамповка представляет собой холодную обработку материалов давлением. При этом получают как готовые детали, так и заготовки (полуфабрикат) для последующей обработки резанием.

Штамповка осуществляется на прессах различной конструкции.

Основными разновидностями штамповки являются прокатка (рис. 21.1, *a*), прессование (рис. 21.1, *б*), волочение (рис. 21.1, *в*), ковка (рис. 21.1, *г*), листовая (рис. 21.1, *д*) и объемная (рис. 21.1, *е*) штамповка.

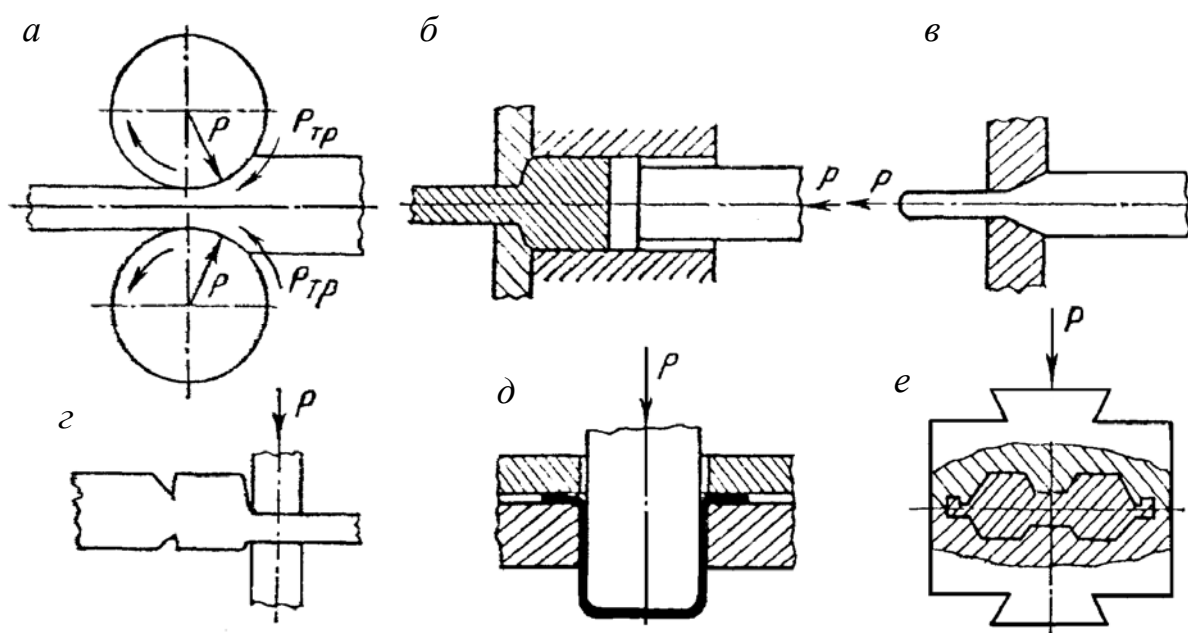


Рис. 21.1. Схема основных видов обработки металлов давлением

Штампы, используемые при холодной обработке металлов, классифицируются по массе, а также по технологическому, конструктивному и эксплуатационному признакам. Штампы по массе разделяются на пять групп: мелкие (до 30 кг), малые (до 70 кг), средние (до 200 кг), крупные (до 500 кг) и особо крупные (до 5000 кг).

По технологическому признаку штампы подразделяются на штампы деформирования с разделением материала (отрезка, вырубка, пробивка, обрезка и др.), штампы пластического деформирования без разделения материалов (гибка, вытяжка, формовка и др.) и комбинированные штампы.

По конструктивному признаку штампы бывают без направляющих и с направляющими устройствами. Штампы без направляющих устройств более просты в изготовлении, имеют сравнительно небольшую массу и габаритные размеры, но неудобны при установке их на прессе и небезопасны в эксплуатации. Эти штампы применяются в основном в мелкосерийном производстве. Штампы с направляющими устройствами более надежны в эксплуатации, широко применяются в серийном и массовом производстве.

По степени совмещения операций (эксплуатационный признак) штампы бывают простые, выполняющие только одну операцию, и комбинированные, производящие по две и более операции. Комбинированные штампы в свою очередь различаются по характеру совмещения операций на штампы последовательного, совмещенного и последовательно-совмещенного действий. У штампов последовательного действия изготовление детали производится за несколько переходов под различными пуансонами при последовательном перемещении штампуемой заготовки. У штампов совмещенного действия получение детали осуществляется за один ход пресса концентрично расположенными пуансонами при неизменном положении

заготовки. У штампов последовательно-совмещенного действия изготовление детали происходит путем сочетания последовательной и совмещенной штамповок.

Наиболее ответственными элементами штампов для холодной штамповки являются матрица 6 (рис. 21.2) и пуансон 10, которые закрепляются соответственно на нижней плите 5 и в пуансонодержателе 9 штампа. Для правильного направления перемещения пуансона при работе штампа служат направляющие втулки 3 и колонки 4, крепление которых производится соответственно в верхней 1 и в нижней 5 плитах. Верхнюю часть штампа закрепляют в ползуне пресса (не показан) с помощью хвостовика 2. Для установки штампуемой заготовки на матрице предусмотрена специальная рамка 8 с фиксаторами, а для снятия детали имеется съемник 7.

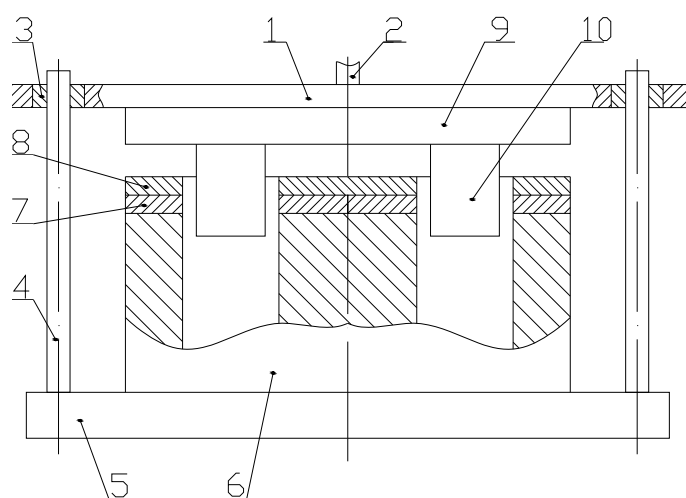


Рис. 21.2. Принципиальная конструкция штампа для холодной штамповки

21.2. Высокэнергетические методы штамповки

Среди высокэнергетических методов штамповки наиболее часто используются следующие:

давлением ударной волны при взрыве взрывчатых веществ в воде (взрывная штамповка);

действием высоковольтного электрического разряда в токонепроводящей жидкости (электрогидравлическая штамповка);

импульсами магнитного поля высокой напряженности (магнитно-импульсная штамповка).

Взрывная штамповка основана на деформации листовой заготовки 2 (рис. 21.3, а) давлением ударной волны, образующейся при взрыве взрывчатых веществ 4 в баке 3 с водой, закрытом крышкой 5. Штампы для взрывной штамповки представляют собой матрицу 1, имеющую рабочую полость соответствующей формы с отверстием б для удаления воздуха.

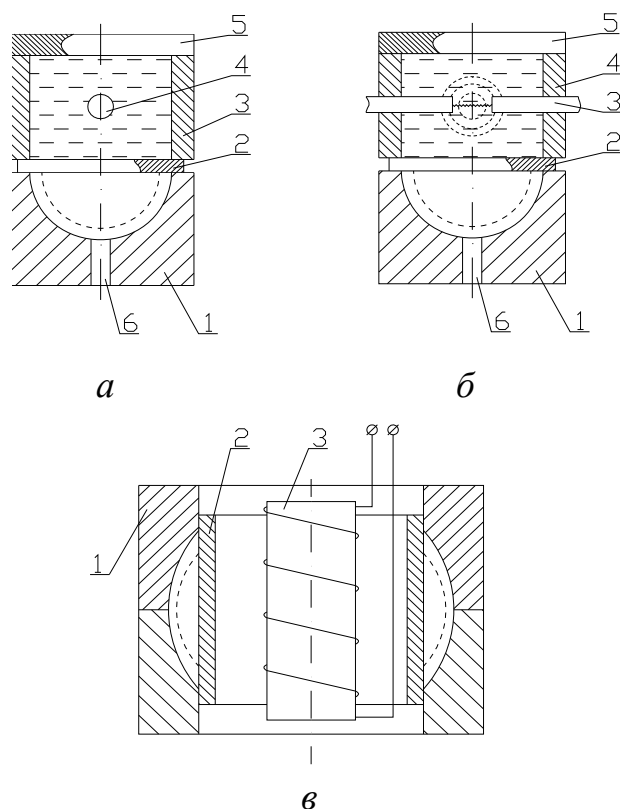


Рис. 21.3. Методы высокоэнергетической штамповки

При электрогидравлической штамповке энергия, необходимая для электрического разряда, накапливается в высоковольтной батарее. За счет этой энергии между электродами 3 (рис. 21.3, б) создается разряд длительностью 0,00004 с, вызывающий появление ударной волны в жидкости, которая деформирует заготовку 2, заставляя ее принять форму матрицы 1.

Сущность штамповки импульсным магнитным полем заключается в следующем: при импульсном разряде электрического тока высокого напряжения на катушку 1 (рис. 21.3, в) в ней образуется мощное магнитное поле, которое воздействует на заготовку 3. Возникающие на поверхности заготовки вихревые токи образуют свое магнитное поле, которое, взаимодействуя с первичным полем, вызывает эффект «отталкивания» заготовки от витков катушки. Заготовка деформируется, принимая профиль матрицы 2.

21.3. Прессование и конструкция пресс-форм

Прессование относится к горячей обработке и является одним из наиболее экономичных способов получения заготовок и деталей приборов. Оно осуществляется в пресс-формах различной конструкции, которые устанавливают на гидравлических прессах и машинах литья под давлением. Обычно пресс-формы снабжены электрическими терморегуляторами, автоматически поддерживающими заданную температуру.

Процесс изготовления детали при прессовании включает следующие переходы:

смыкание пресс-формы;

подпрессовка, т. е. кратковременное раскрытие пресс-формы для выпуска газов, образующихся при нагреве пластмассы;

повторное смыкание пресс-формы и выдержка под давлением;

раскрытие пресс-формы и выталкивание отпрессованных изделий.

Прессованием можно получать детали из пластмасс, резины, легкоплавких металлов и сплавов, порошкообразной фарфоровой, металлической и керамической масс и т. д.

Пресс-формы классифицируются по технологическому и эксплуатационному признакам.

По технологическому признаку пресс-формы подразделяются на три основные группы: прямого прессования, литьевого прессования и литья под давлением. Первые две предназначены для прессования деталей из реактопластов, третья – из термопластов. Когда изделия из реактопластов извлекаются из пресс-форм, последние обычно не охлаждаются, а при получении деталей из термопластичных материалов пресс-формы частично охлаждаются для затвердевания изделия.

По эксплуатационному признаку различают пресс-формы стационарные, полустационарные и съемные. Части стационарных пресс-форм при их работе прикрепляются неподвижно к ползуну и столу пресса, а съемные пресс-формы после запрессовки снимаются для извлечения из них готовых изделий.

Стационарные пресс-формы, как более производительные и удобные в работе, эксплуатируются в автоматическом и полуавтоматическом режимах, а поэтому применяются в крупносерийном производстве. Плиты 1 и 4 стационарных пресс-форм (рис. 21.4) оснащаются системой обогрева 2. Удаление из пресс-формы готовых изделий 3 производится с помощью выталкивателя (штока) 5.

Полустационарные пресс-формы, хотя и закрепляются на прессе, однако при их разьеме снимается кассета, из которой извлекаются изделия. Полустационарная пресс-форма может использоваться для изготовления нескольких различных изделий. В этих случаях применяются съемные элементы (вкладыши или кассеты) с унифицированными посадочными местами. Такая универсальность особенно выгодна при мелкосерийном производстве, поскольку для перехода на новое изделие достаточно изготовить сменный оформляющий вкладыш.

Пресс-формы также классифицируются по направлению плоскости разьема и по конструкции загрузочной камеры. Они бывают с вертикальной и горизонтальной плоскостями разьема, а по конструкции – открытого, закрытого и полужакрытого типов. Пресс-формы открытого типа

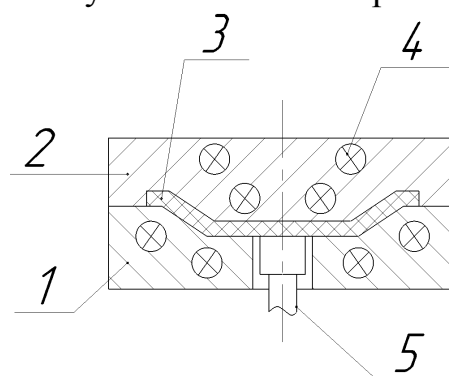


Рис. 21.4. Принципиальная конструкция пресс-формы

(рис. 21.5, *а*) не имеют специальной загрузочной камеры. Прессуемое вещество загружается в оформляющую полость нижней части формы, лишний материал вытекает по плоскости стыка обеих частей пресс-формы. В пресс-формах закрытого типа (рис. 21.5, *б*) загрузочная камера является продолжением оформляющей полости. Более широко применяются пресс-формы полузакрытого типа (рис. 21.5, *в*), загрузочная камера которых имеет простую форму, излишки материалов при прессовании вытекают, как и во втором случае, по каналам, предусмотренным в обеих частях формы.

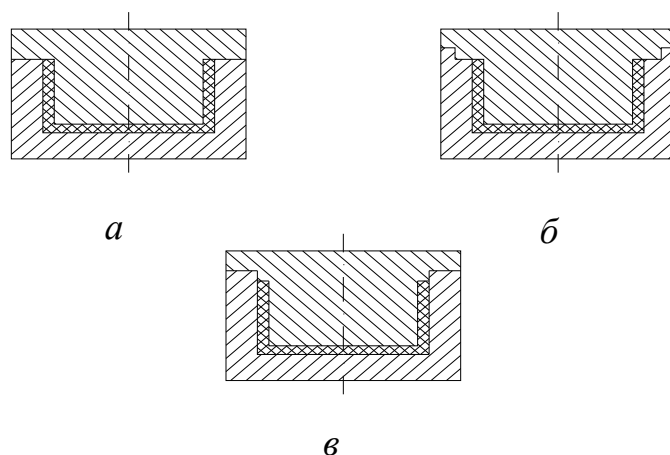


Рис. 21.5. Типы пресс-форм

Точность изготовления пластмассовых изделий зависит от точности оформляющих деталей пресс-формы. Допуски на изготовление этих деталей принимаются более жесткими, чем допуск на пластмассовое изделие. Рабочие детали пресс-форм испытывают большие механические нагрузки и нагреваются до 200 °С, а поэтому подвергаются интенсивному истиранию и коррозии, особенно при переработке пластмасс с наполнителем, что необходимо учитывать при конструировании пресс-форм.

Для предотвращения прилипания прессуемой пластмассы некоторых марок к стенкам пресс-форм и повышения износостойкости последних их необходимо подвергать полированию и последующему электролитическому хромированию.

Глава 22. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ. ЭЛЕМЕНТЫ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

22.1. Отделочные методы обработки

Наиболее распространенными отделочными методами обработки металлов являются полирование, притирка, хонингование, суперфиниширование и шевингование.

Полирование – преимущественно безразмерная обработка, представляющая собой высокоточную отделку поверхностей.

Притирка (доводка) – размерная обработка поверхностей. Притиркой достигают 11–13-го классов чистоты поверхности и 6-го и ниже классов точности, выдерживаются допуски диаметральных размеров до $\pm 0,5$ мкм, непараллельность плоскостей – до $\pm 1,0$ мкм, а при особо тонкой доводке (плоскопараллельные плиты) – до 0,05 мкм.

Наиболее часто применяют ручную и машинно-ручную притирки. Ручную притирку обычно назначают при изготовлении измерительных инструментов, ее выполняют на притирочных плитах. Машинно-ручную притирку производят на станках, вращающих притиры или детали, все остальные движения выполняют вручную. Притиры для этого вида притирки изготавливают в виде раздвижных колец, пробок и брусков.

Хонингование – точная обработка отверстий с помощью мелкозернистых абразивных кругов, закрепленных на хонинговальной головке, совершающей вращательное и возвратно-поступательное движения вдоль оси.

При хонинговании в резании участвует большое количество абразивных зерен, что обеспечивает высокую производительность, низкие давление и температуру в зоне резания (50–150 °С) и, как следствие, сохранение исходной структуры поверхностного слоя.

Хонингование практически не изменяет первоначального положения оси отверстия, так как режущий инструмент самоустанавливается по обрабатываемому отверстию, что достигается шарнирным креплением инструмента.

Суперфиниширование (виброшлифование) – доводочная операция, выполняемая вибрирующими абразивными инструментами (брусками) для удаления микронеровностей на наружных поверхностях деталей. Достигаются наивысшие точность (5-й класс и ниже) и чистота поверхности.

Шевингование – чистовая обработка зубчатых колес. При шевинговании зубьев инструментом является шевер, представляющий собой зубчатое колесо или рейку, у которых для образования режущих кромок зубья прорезаны поперечными канавками. Шевер скоблит металл, снимая тончайшую стружку.

22.2. Движение рабочих узлов станка и элементы режима резания

При обработке деталей резанием заготовка и режущий инструмент перемещаются относительно друг друга и инструмент снимает стружку с поверхности заготовки. Для этой цели каждый металлорежущий станок имеет рабочие узлы (шпиндель, суппорт, заднюю бабку, стол и т. д.), которым сообщаются следующие движения: резания, установочные и вспомогательные.

Движения, при которых с обрабатываемой заготовки срезается слой металла, называются *движениями резания*. К ним относятся главное движение (вращение шпинделя станка) и движение подачи. По виду эти дви-

жения могут быть непрерывными и прерывистыми, а по характеру — вращательными, поступательными, возвратно-поступательными и т. д.

Движения рабочих узлов станка, обеспечивающие такое положение инструмента относительно заготовки, при котором с нее срезается слой материала определенной толщины, называют *установочными*.

Движения рабочих узлов станка, которые не относятся к процессу резания, а служат для перемещения (транспортировки) и закрепления заготовки или инструмента, быстрых перемещений рабочих узлов, изменения частоты вращения и подачи, называют *вспомогательными*.

Элементами режима резания являются скорость резания v , м/мин, подача s , мм/об, и глубина резания t , мм.

Если главное движение вращательное (обработка на токарном станке), то скорость резания определяется по формуле

$$v = \pi D_{\text{заг}} n / 1000,$$

где $D_{\text{заг}}$ — наибольший диаметр обрабатываемой поверхности заготовки, мм;
 n — частота вращения заготовки, об/мин.

Если главное движение возвратно-поступательное, то

$$v = \frac{Lm}{1000} \left(\frac{v_p}{v_x} + 1 \right),$$

где L — расчетная длина хода инструмента, мм;

m — число двойных ходов инструмента в минуту;

v_p / v_x — отношение скоростей рабочего и холостого хода.

Подача s — путь инструмента относительно заготовки за один оборот последней.

Глубина резания t — расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное перпендикулярно к последней. При точении

$$t = (D_{\text{заг}} - d) / 2,$$

где d — диаметр обработанной цилиндрической поверхности, мм.

При рассмотрении процесса резания материалов используются понятия толщины a и ширины b срезаемого слоя материала. *Толщина срезаемого слоя a* — расстояние, измеренное по нормали к поверхности резания между двумя последовательными положениями инструмента за время одного оборота заготовки (рис. 22.1). *Ширина срезаемого слоя b* — расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренное по поверхности резания.

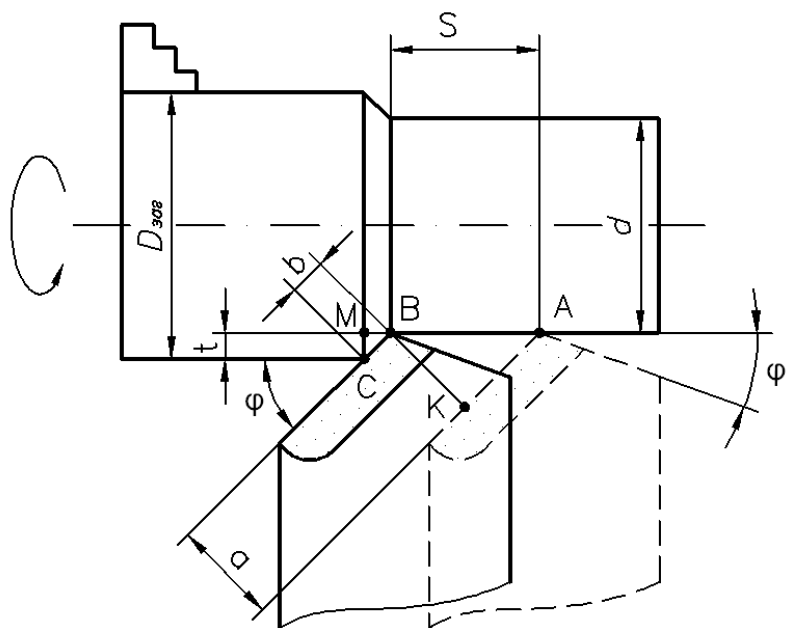


Рис. 22.1. Элементы режима резания

Рассматривая прямоугольные треугольники ABK и BCM (см. рис. 22.1), можно найти соотношения между толщиной среза a и подачей s , а также между b и t :

$$a = s \sin \varphi \text{ и } b = t / \sin \varphi,$$

где φ – главный угол в плане резца.

22.3. Типы приводов и передач станков

Приводом станка называется совокупность устройств, получающих энергию извне и сообщающих движение рабочим узлам станка. Станок получает энергию движения от одного или нескольких электродвигателей. В последнем случае различают привод главного движения, привод подачи, привод быстрых перемещений и т. д.

В зависимости от расположения электродвигателя относительно станка приводы бывают следующих типов: с приставным, фланцевым и встроенным электродвигателем. В настоящее время широкое распространение получили асинхронные электродвигатели. Применяются также электродвигатели постоянного тока и шаговые.

Применение нескольких электродвигателей позволяет упростить кинематическую схему, упрощает механическую часть привода станка и открывает возможность простыми средствами автоматизировать его работу. Приводы бывают со ступенчатым и бесступенчатым регулированием частоты вращения шпинделя и подачи. Приводы со ступенчатым регулированием выполняются в виде коробок передач, они просты по конструкции и надежны в эксплуатации, однако не всегда позволяют получить оптимальные режимы резания.

В приводах станков применяются ременные, зубчатые, реечные, винтовые, червячные и другие передачи.

Кинематическая схема станка – условное изображение в одной плоскости всех механизмов станка в их совокупности.

Кинематической цепью называется совокупность звеньев станка, расположенных в определенной последовательности и предназначенных для передачи движения (рис. 22.2).

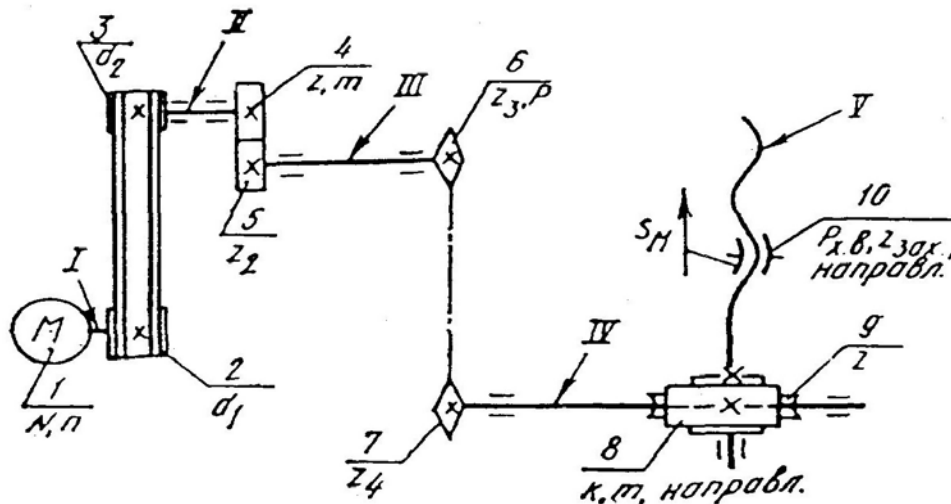


Рис. 22.2. Пример кинематической цепи:

1 – двигатель; 2, 3 – ременная передача; 4, 5 – цилиндрические зубчатые колёса; 6, 7 – звездочки цепной передачи; 8 – червяк; 9 – червячное колесо; 10 – ходовой винт

Кроме условного изображения передач на схеме кинематической цепи указывают число зубьев звездочек z_3, z_4 , зубчатых z_1, z_2 и червячных z колес и их модуль m , число заходов червяков k и винтов $z_{зах}$, шаг винтов $p_{х.в}$ и направление резьбы, диаметры шкивов d_1, d_2 , мощность N и частоту вращения n двигателей.

22.4. Классы и конструктивные элементы инструментов

Все режущие инструменты можно подразделить на три класса: призматические (резцы), хвостовые (сверла) и насадные (дисковые фрезы). Указанные инструменты, несмотря на конструктивные отличительные особенности, имеют общие составные части. Каждый из инструментов содержит рабочую часть, снабженную одним или несколькими режущими лезвиями, и соединительную часть. Рабочая часть, в свою очередь, состоит из двух элементов: режущего, которым осуществляется снятие стружки, и направляющего, служащего для зачистки обработанной поверхности и направления инструмента в процессе резания.

Соединительная часть у инструментов следующая: у резца – это державка, у сверла – цилиндрический или конический хвостовик, а у дисковой фрезы – цилиндрическое отверстие. Соединительные части инструментов предназначены для закрепления их на станке и передачи усилия резания.

Многолезвийные инструменты (сверла, развертки, фрезы, протяжки, метчики и т. д.) имеют зубья в виде режущего клина и те же конструктивные элементы, что и обычный резец.

Рассмотрим конструктивные элементы многолезвийных инструментов на примере проходного резца (рис. 22.3), который состоит из головки I и державки II. Последняя имеет сечение квадратной, прямоугольной или круглой формы и служит для закрепления резца в резцедержателе станка.

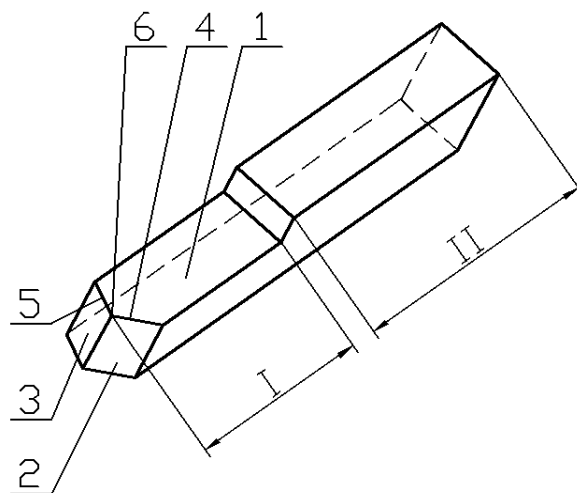


Рис. 22.3. Конструктивные элементы резца

Головка резца выполняет работу резания. Ее элементами являются передняя поверхность *1*, служащая для схода стружки, главная задняя поверхность *2*, вспомогательная задняя поверхность *3*, главное режущее лезвие *4*, вспомогательное режущее лезвие *5*, вершина резца *6*.

Указанные элементы присущи не только резцам, но и всем другим одно- и многолезвийным режущим инструментам, зубья которых в сечении имеют форму клина.

22.5. Инструментальные материалы

Применяемые инструментальные материалы подразделяются на следующие группы:

- 1) инструментальные стали (углеродистая и легированная);
- 2) быстрорежущая сталь;
- 3) твердый спеченный сплав;
- 4) минералокерамика и керметы;
- 5) синтетические сверхтвердые материалы (абразивы, алмаз, эльбор, рубин, лейкосапфир).

Углеродистые инструментальные стали – это стали марок У7А–У13А с содержанием углерода 0,7–1,3 %, примесей серы – до 0,02 % и фосфора – до 0,03 %. Применяются углеродистые стали сравнительно редко и главным образом для инструментов, работающих при скоростях резания до 3–5 м/мин. Теплостойкость углеродистых инструментальных сталей может

быть повышена с 200 до 250–350 °С за счет введения в их состав хрома, ванадия, молибдена, марганца, кремния и, особенно, вольфрама. Допускаемая скорость резания инструментов из этих сталей 10–15 м/мин.

Легированные инструментальные стали подразделяются на стали неглубокой и глубокой прокаливаемости. К сталям первой подгруппы относятся вольфрамовая В1 и хромовольфрамовая (алмазная) ХВ5 стали, которые иногда применяются для изготовления мерительного инструмента, метчиков и разверток. Вследствие повышенной твердости (72 HRC) алмазная сталь рекомендуется для изготовления инструмента, применяемого при обработке твердых материалов при низких скоростях резания.

Из сталей второй подгруппы (глубокой прокаливаемости) для изготовления режущего инструмента применяются хромокремнистая 9ХС и хромовольфрамомарганцовистая ХВГ.

Быстрорежущие стали повышенной производительности содержат кобальт и ванадий. Они применяются при обработке жаропрочных сталей и сплавов. Повышение стойкости быстрорежущих сталей некоторых марок обеспечивается за счет насыщения их азотом (0,06–0,09 %).

Значительное повышение стойкости твердых спеченных сплавов (почти в три раза) обеспечивается за счет покрытия их слоем карбидов TiC и нитридов TiN титана толщиной в 5 мкм.

Обычная минералокерамика состоит из окиси алюминия Al_2O_3 и окиси магния MgO. Ее теплостойкость 1200 °С. Прочность инструментов из минералокерамики повышают покрытием их окисью меди или железа.

Керметы являются улучшенной разновидностью минералокерамики и состоят из окиси алюминия Al_2O_3 и карбидов вольфрама и молибдена.

При чистовой обработке черных металлов применяют лейкосапфир, а цветных металлов – рубин или электрокорунд (Al_2O_3 – 97,8 %, Cr_2O_3 – 2,2 %). При чистовой обработке закаленных стальных и неметаллических изделий (например, из керамики) используют лезвийные инструменты, оснащенные кристаллами эльбора и алмаза.

22.6. Классификация инструментов

Режущие инструменты подразделяются по конструкции и виду обрабатываемых поверхностей.

По конструкции инструменты классифицируются на следующие подгруппы:

1. Резцы общего назначения и фасонные резцы для различных работ на токарных и строгальных станках.
2. Сверла для получения и рассверливания отверстий.
3. Зенковки для снятия фаски и получения фасонных отверстий.
4. Развертки для чистовой обработки отверстий.
5. Напильники, рашпили и надфили разнообразной формы в виде стержней и дисков с множеством мелких режущих зубьев.

6. Протяжки и прошивки в виде стержня или плиты с поперечными зубьями, размеры которых увеличиваются по направлению к заднему хвостовику. Они используются для обработки внутренних и наружных поверхностей.

7. Фрезы общего назначения и специальные (борфрезы, гравировальные, червячные и др.), представляющие собой тела вращения с множеством зубьев на образующей.

8. Метчики для получения резьбы в отверстиях.

9. Плашки, резьбообразующие ролики и головки для нарезания и накатывания наружной резьбы.

10. Долбяки для зубодолбления зубчатых колес, шлицев валов и т. д.

11. Шеверы для чистовой обработки колес малых модулей ($m < 3-4$ мм) методом «скобления».

12. Комбинированные инструменты, представляющие сочетание нескольких одно- или разнотипных инструментов.

13. Инструменты для автоматизированного оборудования и для станков с ЧПУ, включающие режущие бесподналадочные и быстросменные инструменты, а также приспособления для настройки и контроля работы режущих инструментов.

14. Абразивные, алмазные, эльборовые и другие инструменты из связанных порошкообразных материалов, используемые в виде кругов, брусков, а также порошок и отдельные крупные зерна или кристаллы для чистовой обработки деталей.

По видам обрабатываемых поверхностей различают режущие инструменты:

1) для обработки плоскостей, а также наружных фасонных и цилиндрических поверхностей тел вращения (резцы, фрезы, протяжки, напильники, шлифовальные круги и т. д.);

2) для обработки отверстий (сверла, расточные резцы, зенкеры, развертки, протяжки, прошивки и т. д.);

3) для получения резьбы (резьбовые фрезы и резцы, метчики, резьбонарезные и резьбонакатные плашки и головки, накатные ролики и т. д.);

4) для обработки поверхностей зубьев колес или шлицевых валов.

В частности, для обработки цилиндрических зубчатых колес методом копирования применяются дисковые фрезы, а методом обкатки – червячные фрезы, долбяки, шеверы и шлифовальные круги. Конические прямозубые колеса нарезают зубострогальными резцами.

Кроме того, инструменты подразделяются на цельные и составные (с неподвижным присоединением режущих пластинок и с механическим их креплением), а также (по виду закрепления на станке) на хвостовые, насадные и призматические. Различают стандартные и специальные инструменты.

Глава 23. ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

23.1. Общая характеристика материалов

В зависимости от назначения приборов их детали изготавливают из черных и цветных металлов и их сплавов, а также из пластмасс и стекла.

Алюминиевые сплавы используют для производства корпусов приборов и изготовления оправ, колец, тубусов. Из сплавов цинка делают детали, работающие на трение, а из магниевых — детали с высокой демпфирующей способностью (способностью поглощать вибрации).

Широкое использование в приборостроительной промышленности находят минералокерамические детали (платы, втулки), изготовленные из глинозема (Al_2O_3).

Используемые в приборостроении стекла бывают промышленные, технические и оптические. Из них первые два в основном состоят из трех компонентов. Оптические стекла наиболее сложные, они содержат до десяти компонентов. Большое распространение получают ситаллы. Структура ситаллов — ориентированные микроскопические кристаллы стекла, сцементированные аморфным стеклом. Ситаллы термически устойчивы и обладают высокой механической прочностью.

В приборостроении также находят применение стекла, меняющие цвет в зависимости от уровня освещения (фотохромные).

23.2. Свойства металлов

Основными свойствами металлов являются механические, физико-химические, технологические и эксплуатационные.

Механические:

деформация (упругая и пластическая);

прочность – способность сопротивляться разрушению;

пластичность – способность изменять форму и размеры без разрушения;

твердость – способность материала сопротивляться внедрению в него другого тела.

Физико-химические:

температура плавления;

плотность;

коэффициенты линейного и объемного расширения;

электро- и теплопроводность;

химическая активность;

антикоррозионные свойства.

Технологические (способность материала подвергаться различным методам горячей и холодной обработки):

литейные свойства (жидкотекучесть, усадка и склонность к ликвации, т. е. к химической и структурной неоднородностям, которые возникают в процессе кристаллизации);

ковкость;

свариваемость и возможность обработки режущими инструментами.

Эксплуатационные:

хладостойкость;

жаропрочность;

антифрикционность;

способность прирабатываться к другому материалу.

23.3. Общие понятия о процессе резания

Обработка резанием может производиться различными режущими инструментами: резцами, сверлами, фрезами, протяжками и т. д. Однако для всех их характерна единая форма режущей части в виде режущего клина.

При внедрении в материал режущего инструмента (клина) на его переднюю А (рис. 23.1) и заднюю Б поверхности действуют нормальные силы N_1 , N_2 и силы трения F_1 , F_2 . Общая равнодействующая сила P является силой сопротивления резанию, а равна ей по величине и противоположно направлена – сила резания.

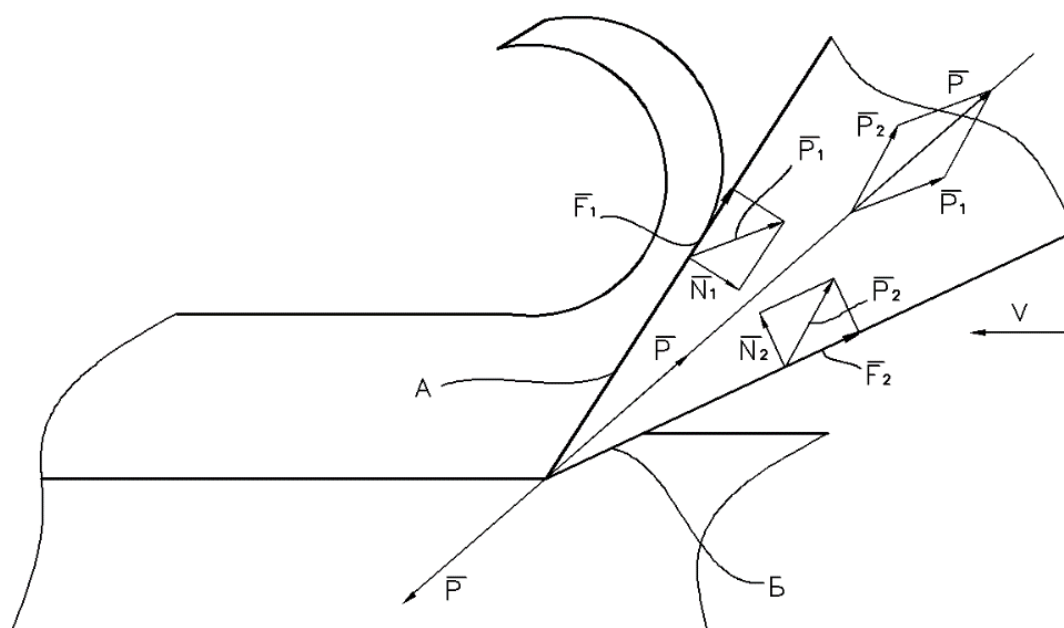


Рис. 23.1. Схема действия сил на режущий клин

Под действием этой силы происходят деформирование и разрушение срезаемого слоя материала, что сопровождается следующими физическими явлениями:

1) в деформированном приповерхностном слое детали возникают упругие и пластические деформации, а на обработанной поверхности образуются неровности;

2) в зоне резания возникает неоднородное температурное поле;

3) на передней поверхности режущего клина может появиться слоистое металлическое образование, называемое наростом;

4) наблюдаются различные виды изнашивания режущего клина: абразивный, адгезионный, диффузионный и др.;

5) при соприкосновении СОЖ с нагретыми поверхностями инструмента и заготовки в них происходят сложные физико-химические процессы;

6) в системе «станок–приспособление–инструмент–деталь» (СПИД) могут возникать вынужденные колебания и автоколебания.

23.4. Процесс образования стружки и ее типы

При резании металлов образуется стружка четырех типов (рис. 23.2): сливная (*а*), суставчатая (*б*), элементная (*в*) и надлома (*г*).

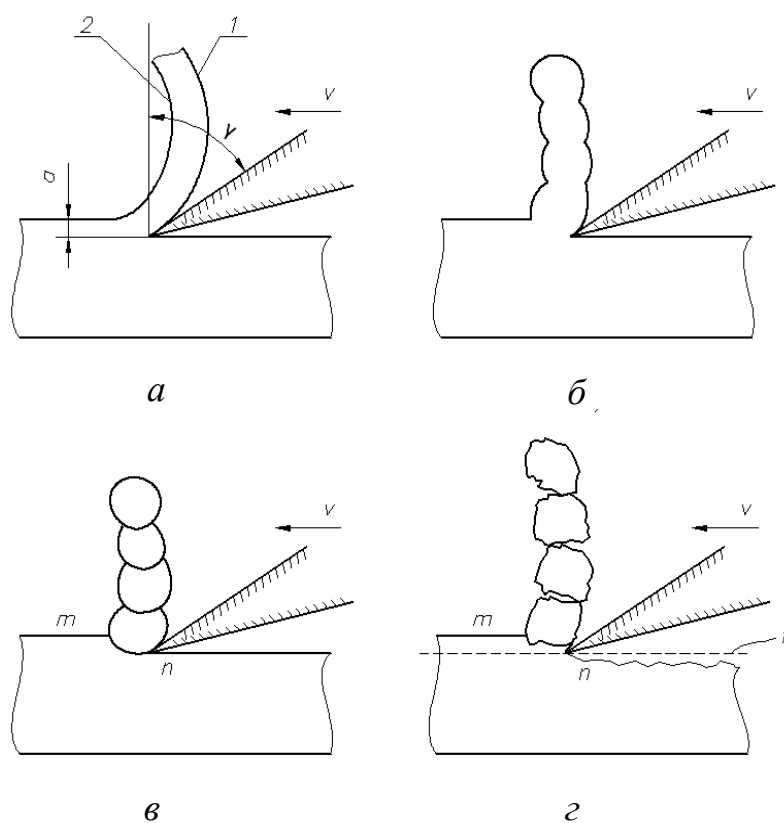


Рис. 23.2. Типы стружки

В случае небольшой толщины t срезаемого слоя, высокой скорости резания v и значительном переднем угле инструмента γ при обработке вязких и пластичных материалов образуется сливная стружка, основным признаком которой является ее непрерывность. Контактная поверхность 1 та-

кой стружки сравнительно гладкая, а поверхность 2 покрыта мелкими зазубринками (насечкой).

По мере увеличения твердости и хрупкости обрабатываемого материала сливная стружка переходит в суставчатую, а затем в элементную или даже надлома. При этом элементная стружка обычно состоит из отдельных «элементов», слабо связанных друг с другом. Границу mn , отделяющую образовавшийся элемент стружки от срезаемого слоя материала, называют поверхностью скалывания. В случае стружки надлома из поверхностного слоя заготовки происходит вырывание или откалывание режущей частью инструмента крупных частиц неправильной формы. Образование этой стружки сопровождается появлением металлической пыли, а начало поверхности скалывания mn может располагаться даже ниже поверхности резания f .

23.5. Образование нароста при резании

При образовании сливной стружки обрабатываемый материал часто задерживается на передней поверхности инструмента около главного режущего лезвия, образуя наслоение. Это наслоение называется **наростом**. Наиболее вероятной гипотезой о причинах его возникновения можно считать торможение и схватывание тонких контактных слоев стружки на шероховатой передней поверхности инструмента. Слои нарастают друг на друга, пока нарост не достигнет размеров, максимально возможных при данных условиях обработки. Твердость нароста в 2,5–3,5 раза больше твердости исходного вещества, и он принимает на себя функции режущего клина. Однако нарост нестабилен. Достигнув максимальных размеров, он разрушается. Частота срывов нароста доходит до нескольких сотен в минуту.

Наростообразование оказывает следующее влияние на процесс резания:

- 1) уменьшается угол резания, в результате чего изменяются сопротивление резанию и условия трения;
- 2) увеличиваются микронеровности на обработанной поверхности;
- 3) при наростообразовании не обеспечивается требуемая точность обработки деталей;
- 4) периодические срывы нароста приводят к возникновению вибраций, ухудшающих качество обработанной поверхности, поэтому нарост недопустим при чистовой обработке;
- 5) в зоне наростообразования передняя и задняя поверхности режущего клина инструмента защищаются от разрушения;
- 6) для каждого материала имеется диапазон скоростей резания, при которых размеры нароста максимальны.

Диапазон скоростей резания при обработке, например стали 40, можно разделить на четыре зоны с разной интенсивностью образования нароста. При $v < 3$ м/мин нароста почти нет, а при $v = 3–50$ м/мин нарост появляется и постепенно увеличивается. При $v = 50–80$ м/мин нарост умень-

шается, а при скоростях резания $v = 80\text{--}120$ м/мин и больше нароста не образуется.

23.6. Вибрации при резании материалов

В процессе резания в системе СПИД могут возникать колебания (вибрации). Колебания инструмента относительно обрабатываемой детали (или наоборот) вызывают изменения толщины срезаемого слоя и силы резания. При этом ухудшается качество обработанной поверхности (появляется волнистость) и снижается стойкость режущего инструмента.

При резании металлов имеют место как вынужденные колебания, так и автоколебания. Вынужденные колебания при резании могут быть вызваны дисбалансом вращающихся частей станка, обрабатываемой заготовки и инструмента. В основном источником автоколебаний является непостоянство размеров нароста при резании, что приводит к изменению переднего угла инструмента и силы резания.

В металлорежущем станке, например в токарном, обычно рассматривают две основные колебательные системы: систему заготовки (заготовка, шпиндель, пиноль) и систему инструмента (инструмент, резцедержатель, суппорт). Обе системы имеют различную частоту собственных колебаний. В связи с этим вибрации при резании подразделяются на два вида:

вибрации I рода – низкочастотные (50–300 Гц) колебания заготовки, которые вызывают появление звука низкого тона и создают грубую волнистость обработанной поверхности;

вибрации II рода – высокочастотные (800–3000 Гц) колебания инструмента, сопровождающиеся звуком высокого тона (свист) и создающие мелкую рябь на обработанной поверхности.

Основными методами борьбы с вибрациями являются:

1. Балансировка инструментов, вращающихся с большими скоростями (например, абразивных кругов).

2. Выбор рациональных геометрических параметров режущего инструмента. Например, при увеличении переднего угла резца φ с 30° до 80° обеспечивается снижение вибраций, что дает возможность существенно повысить глубину резания.

3. Улучшение динамических свойств системы СПИД путем применения различных виброгасителей. Повышать демпфирующую способность колебательной системы СПИД можно также за счет установки в узлах станков демпфирующих элементов, изготовления корпусов инструментов из материалов с большим декрементом затухания, например, державок резцов из чугуна, хвостовиков сверл из пластмассы. (Декремент затухания

$\Theta = \frac{1}{N}$, где N – число колебаний, по истечении которых их амплитуда уменьшается в e раз).

4. Повышение жесткости системы СПИД. При этом повышается собственная частота вибраций и снижается вероятность их возникновения. Жесткость системы СПИД можно повысить использованием коротких и более жестких инструментов, жестких приспособлений и оснастки (оправок и державок), а также за счет уменьшения биения шпинделя и ликвидации зазоров в суппорте станка.

5. Выполнение условия гладкости траектории, исключая резкие смены направлений движения инструмента или заготовки (гоночные траектории), что позволяет вести обработку на максимальных подачах, без разгона и торможения в углах и тем самым снижает динамические нагрузки на узлы станка.

6. Обеспечение постоянной нагрузки на инструмент. Для предотвращения перегрузки инструмента в отдельных местах обрабатываемой поверхности вводятся трохоидальные движения, при которых исключается резание на полную ширину фрезы и тем самым снижаются силы резания.

7. Обработка по принципу «остаточный материал». После каждой операции специальная программа формирует блок остаточного материала, поэтому на следующей операции точно известно, сколько материала снято и сколько осталось. Работая с блоком остаточного материала, инструмент не ходит на рабочих подачах, где материал уже удален, и холостые ходы выполняются в безопасной близости от металла.

8. Использование оптимизированных траекторий. При обработке разных участков детали сложной конфигурации назначают различные траектории движения инструмента (возвратно-поступательную, круговую, спиральную и т. д.). В таком случае целесообразно применять специальную программу, которая автоматически формирует оптимальную траекторию для каждого участка детали и затем гладко соединяет эти траектории в одну.

Глава 24. ТОЧЕНИЕ И ФРЕЗЕРОВАНИЕ

24.1. Классификация резцов общего назначения

Резцы классифицируют:

1. По применению на станках – токарные, автоматные, револьверные, строгальные, долбежные, для станков с ЧПУ и автоматических линий и т. д. Наиболее распространенными являются токарные. Резцы для токарных автоматов и полуавтоматов отличаются от обычных токарных резцов размерами и конструкцией. Они имеют меньшее поперечное сечение державки, их рабочая часть (режущая пластинка) несколько длиннее обычной, что повышает срок службы этих резцов.

2. По виду обработки – проходные (рис. 27.1, *а*, *б*), подрезные (рис. 24.1, *в*), отрезные (рис. 24.1, *з*), расточные (рис. 24.1, *д*), резьбонарезные (рис. 24.1, *е*) и т. д.

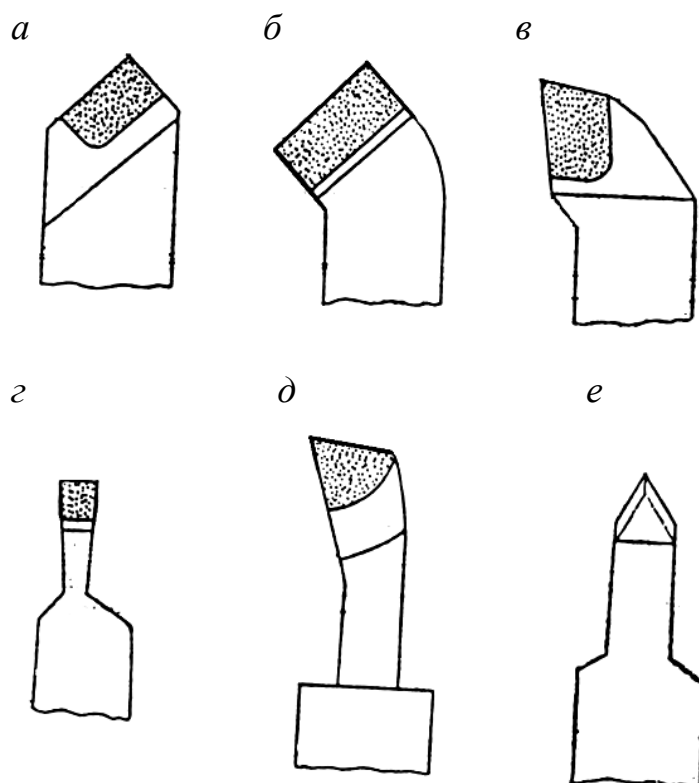


Рис. 24.1. Типы токарных резцов

3. По роду материала, из которого изготовлена рабочая часть, – быстрорежущие, твердосплавные, резцы из инструментальной стали, алмазные, эльборовые, рубиновые, лейкосапфировые и другие резцы с креплением перечисленных кристаллов зачеканкой, запрессовкой и механическим способом.

24.2. Общие сведения о токарных станках

Основными техническими характеристиками токарного станка являются наибольший диаметр заготовки и ее длина, которые могут быть обработаны на нем.

Токарные станки подразделяются на собственно токарные, не имеющие ходового винта для нарезания резьбы резцами, токарно-винторезные, токарно-револьверные, токарно-карусельные, токарно-лобовые, токарно-арматурные и резьботокарные.

Лобовые и карусельные токарные станки предназначены для обработки деталей больших диаметров и сравнительно небольшой длины. Лобовые станки вместо кулачкового патрона имеют планшайбу большого диаметра и не имеют задней бабки. На карусельных станках шпиндель расположен вертикально, и на нем закреплена планшайба (вместо кулачкового патрона). По компоновке они бывают одно- и двухстоечными (портального типа).

На токарно-револьверных станках обрабатываются детали небольших и средних размеров сложной формы, преимущественно из пруткового материала, когда для их изготовления требуется применять несколько инструментов: при обработке наружных поверхностей – резцы, отверстий – сверла, зенкеры, развертки, метчики и т. д. Эти станки не имеют задней бабки и ходового винта, а снабжены револьверной головкой, в гнездах которой устанавливаются различные инструменты.

Токарно-арматурные станки используются при изготовлении точных оправ для крепления оптических деталей и при завальцовке линз в оправы.

24.3. Обработка эксцентриковых деталей

Эксцентриковыми называются детали с двумя и более поверхностями вращения, оси которых параллельны друг другу. Такими деталями являются эксцентрики (рис. 24.2, а, б) и эксцентриковые валики (рис. 24.2, в).

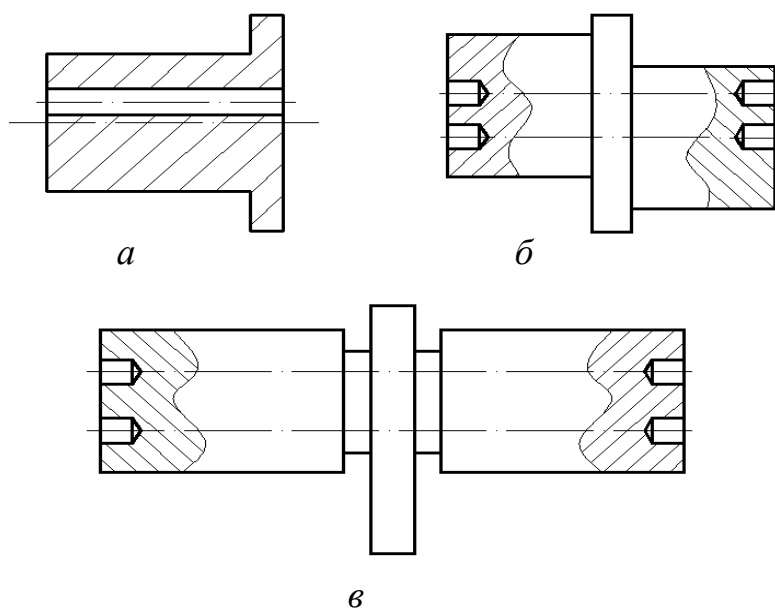


Рис. 24.2. Типы эксцентриковых деталей

Эксцентриковые детали в большинстве случаев обтачивают в центрах. При величине эксцентриситета более 10 мм по разметке или по кондуктору на торцах заготовки сверлят по два центровых отверстия, смещенных одно относительно другого на величину эксцентриситета. Базируясь то на одни, то на другие центровые отверстия, обрабатывают различные цилиндрические поверхности.

При эксцентриситете вала меньше 10 мм заготовку берут длиннее на две глубины центровых отверстий, сверлят по одному центровому отверстию в каждом торце заготовки и обтачивают поверхности, расположенные на оси этих центровых отверстий. Затем с двух сторон срезают участки с центровыми отверстиями, по кондуктору или по разметке сверлят но-

вые центровые отверстия, смещенные от оси проточенной поверхности на эксцентриситет, и обтачивают поверхности, симметричные относительно новой оси заготовки.

Высокую точность обработки эксцентриковых деталей получают в четырехкулачковом патроне. Заготовку сначала обрабатывают как цилиндр в трехкулачковом патроне, после чего ее закрепляют в четырехкулачковом патроне следующим образом. Кулачки патрона устанавливают на равном расстоянии от центра в соответствии с диаметром заготовки. Затем один из кулачков смещают от центра на величину эксцентриситета, устанавливают по нему заготовку, поджимают противолежащий кулачок, а за ним – поочередно два остальных.

Получение эксцентриковых деталей в трехкулачковом патроне может быть достигнуто установкой мерной пластинки между заготовкой и одним из кулачков патрона. Толщина t пластинки определяется по формуле

$$t = 1,5e \left(1 + \frac{e}{2D} \right),$$

где e – эксцентриситет, мм;

D – диаметр заготовки, зажимаемой в кулачках патрона.

24.4. Общие сведения о процессе фрезерования

Фрезерование предназначено для обработки металлических и неметаллических материалов фрезами, которые являются многозубыми инструментами. Каждый зуб фрезы представляет собой резец (или режущий клин) с присущими ему конструктивными элементами.

Фрезы можно классифицировать по следующим признакам:

- 1) по материалу рабочей части – быстрорежущие, твердосплавные, алмазные;
- 2) способу крепления – насадные и хвостовые;
- 3) форме зубьев – с прямыми, винтовыми и угловыми зубьями;
- 4) конструкции зубьев – с остrokонечными (острозаточенными) и с затылованными зубьями;
- 5) характеру работы – отрезные, пазовые, угловые, фасонные.

Несмотря на большое разнообразие фрез, схема их работы соответствует или цилиндрическому (рис. 24.3, *а*), или торцевому (рис. 24.3, *б*) видам фрезерования.

При цилиндрическом фрезеровании обработка производится зубьями, находящимися на цилиндрической поверхности фрезы, ось которой параллельна обрабатываемой поверхности, а при торцевом – зубьями, расположенными на поверхности фрезы, ось которой перпендикулярна к обрабатываемой поверхности.

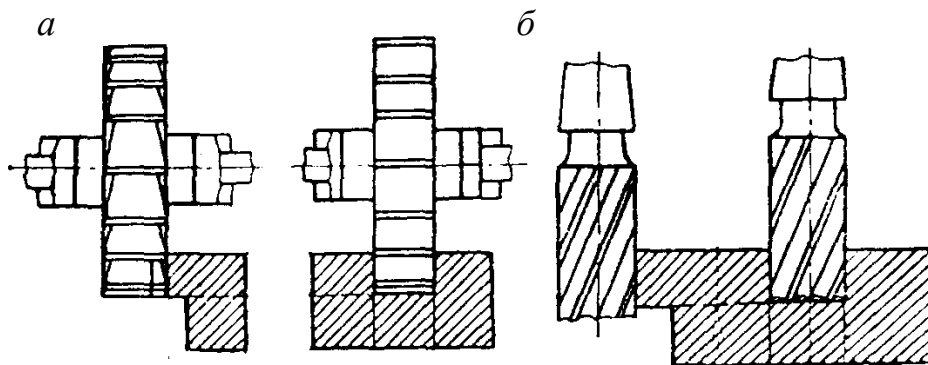


Рис. 24.3. Пример цилиндрического и торцевого фрезерования

Глава 25. СВЕРЛЕНИЕ И РАЗВЕРТЫВАНИЕ

25.1. Устройства для крепления осевых инструментов

Получение точных отверстий (7-го качества) с малой шероховатостью поверхностей ($Ra = 1,25-0,32$ мкм) связано с большими трудностями. Не всегда удается избежать биения инструментов и обеспечить нужное направление при их работе.

Точность обработанных отверстий зависит от метода закрепления осевых инструментов и точности станка. Крепление инструментов в зависимости от типа станка производится в его шпинделе через разрезные переходные втулки, а также цанговые, кулачковые, быстросменные, качающиеся и плавающие патроны.

Разрезные переходные втулки (рис. 25.1, *a*) обеспечивают достаточно точное центрирование даже мелкоразмерного осевого инструмента диаметром 2–3 мм.

Для закрепления сверл малого диаметра (до 1 мм) широко используются цанговые патроны (рис. 25.1, *б*), состоящие из корпуса 1 с хвостовиком, цанги 2 и гайки 3. Цанга располагается в отверстии корпуса и конусом сопрягается с его конусной фаской. При завинчивании гайки цанга смещается вдоль оси. Действием конусной фаски отверстия корпуса лепестки цанги сжимаются, центрируя и закрепляя при этом сверло 4, установленное в посадочное отверстие.

Сверлильный кулачковый патрон является более универсальным зажимным инструментом, чем втулки и цанги, так как в нем можно закреплять инструменты диаметром от 0,5 до 16 мм. Сверлильный кулачковый патрон (рис. 25.1, *в*) состоит из корпуса 2, втулки 3, кулачков 6 и кольца 4. На верхней части кулачков нарезана резьба, сопрягающаяся с наклонной резьбой на кольце 4, которое запрессовано во втулку 3. При закреплении сверла в патроне втулка сначала вращается вручную, а затем с помощью шестеренки – ключом 5. С поворотом втулки 3 вместе с ней вращается кольцо 4, которое навинчивается на кулачки 6 и перемещает их в наклон-

ных пазах в корпусе 2. При этом сверло центрируется и зажимается. Для установки в шпиндель станка кулачковые патроны снабжены коническим хвостовиком или гнездом.

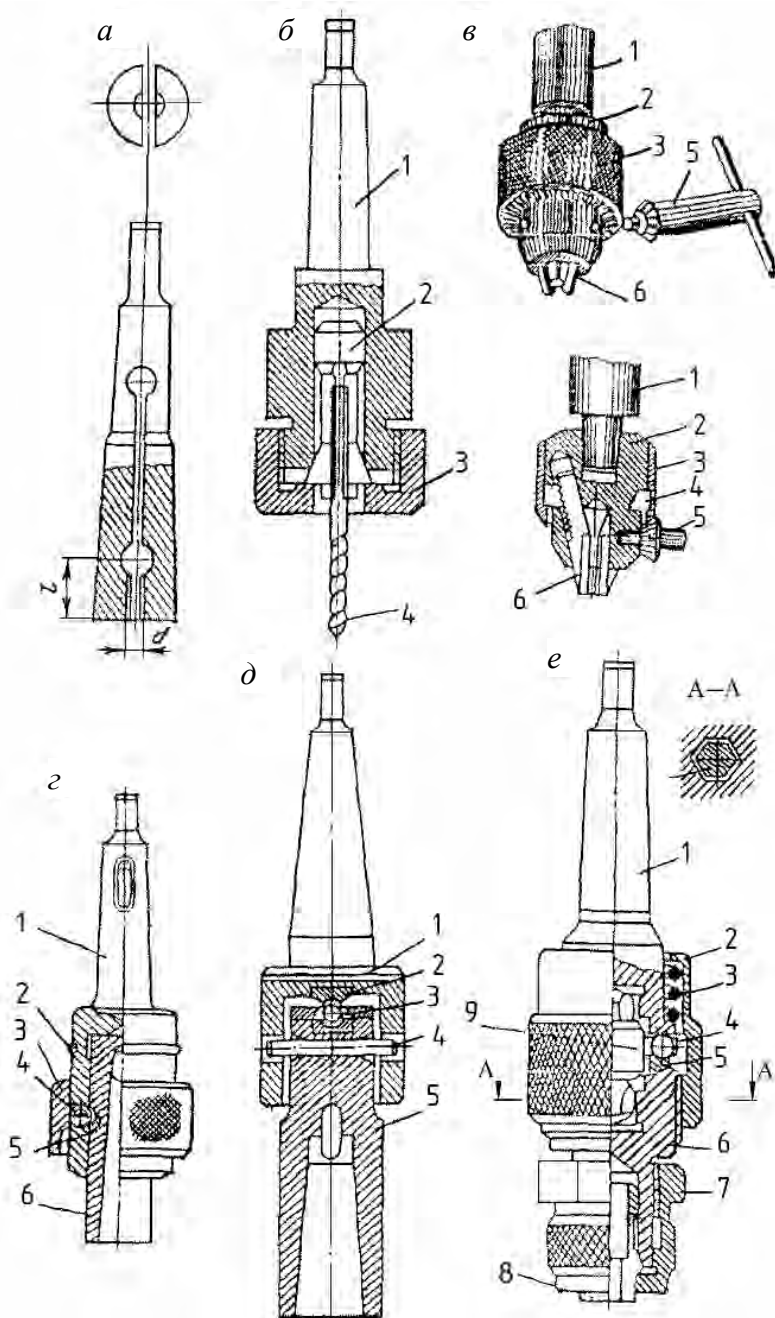


Рис. 25.1. Типовые устройства для крепления осевых инструментов

Для пооперационной обработки отверстий несколькими инструментами (сверло–зенкер–развертка–метчик) последние закрепляются в быстросменных патронах (рис. 25.1, з). Корпус 1 патрона устанавливается в шпинделе станка с помощью хвостовика. В цилиндрическое гнездо патрона вставляется сменная втулка б с коническим гнездом под инструмент. Вращение от корпуса патрона передается втулке через два шарика 4. Для

замены втулки с установленным инструментом необходимо поднять обойму 3 вверх до упора в разрезное пружинное кольцо 2, находящееся на корпусе патрона. При этом шарики выйдут из углублений 5 втулки 6, и ее вместе с инструментом можно будет извлечь из гнезда патрона.

При обработке точных отверстий (7-го качества) развертками используют качающиеся (рис. 25.1, *д*) и плавающие (рис. 25.1, *е*) самоустанавливающиеся патроны. В цилиндрическое гнездо корпуса 1 качающегося патрона на штифте 4 установлена с зазором втулка 5 с коническим гнездом под хвостовик развертки. Втулка имеет осевую опору в виде шарика 3 и подпятника 2. При развертывании отверстий втулка может качаться в двух плоскостях.

Между торцами хвостовика 1 и втулки 6 плавающего патрона на шайбе 5 в сепараторе 4 установлены шарики, через которые втулка от хвостовика воспринимает осевую силу резания при обработке отверстия. Крутящий момент от хвостовика к втулке передается через поводок 9, имеющий по концам скругленные шестигранные выступы, позволяющие втулке с инструментом свободно наклоняться относительно хвостовика. Верхний выступ поводка входит в шестигранное отверстие хвостовика, а нижний – в аналогичное отверстие втулки 6. Поджим втулки 6 к хвостовику 1 выполняется пружиной 3, которая действует на фланец гайки 2, связанной резьбой со втулкой 6. Инструмент в патроне закрепляется с помощью гайки 7, которая при вращении по резьбе втулки 6 смещает в осевом направлении цангу 8.

25.2. Типы, геометрические параметры и конструктивные элементы сверл

Сверла классифицируются как по размерам, так и по конструкции. Для получения отверстий малого диаметра (до 3,0 мм) используются мелкоразмерные сверла. Они бывают следующих типов (классификация по конструкции): стержневые с одной или двумя лысками (площадками) (рис. 25.2, *а, б*); перовые (рис. 25.2, *в–д*), спиральные (рис. 25.2, *е–к*) и твердосплавные (рис. 25.2, *л–н*).

Существуют также специальные сверла. Например, при сверлении отверстий в стекле используют трубчатые алмазные сверла, рабочая часть которых имеет форму пустотелого цилиндра.

Геометрические параметры и конструктивные элементы сверл рассмотрим на примере спирального сверла (рис. 25.3). Сверло в общем случае состоит из следующих параметров: рабочей части l_1 , шейки l_3 и хвостовика l_4 , последний из которых может иметь цилиндрическую или конусную форму. В свою очередь, рабочая часть сверла состоит из режущего l_2 и направляющего l'_2 участков.

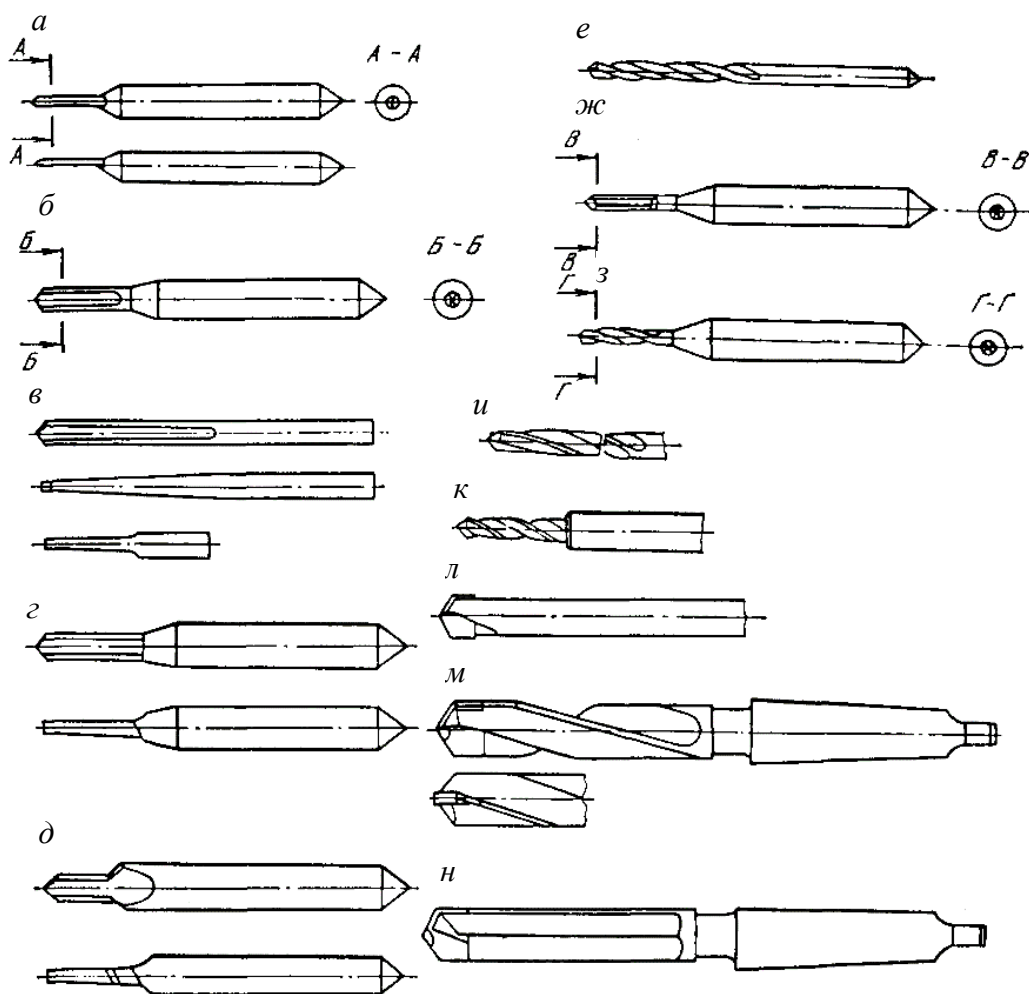


Рис. 25.2. Типы мелкогабаритных сверл

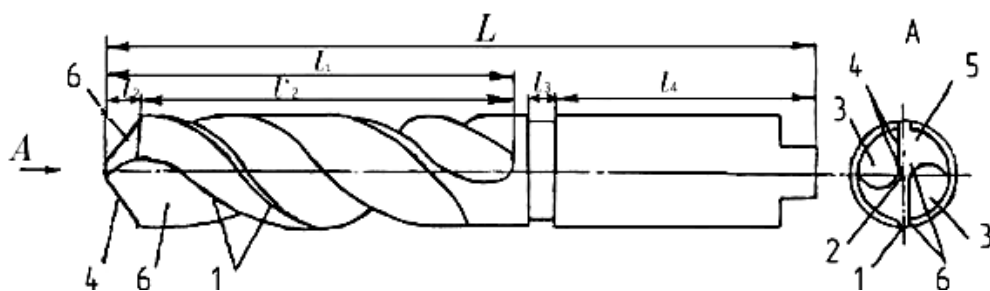


Рис. 25.3. Конструктивные элементы спирального сверла

Рабочая часть имеет следующие конструктивные элементы: 1 – вспомогательные режущие лезвия; 2 – поперечное режущее лезвие; 3 – стружечные канавки; 4 – два главных режущих лезвия; 5, 6 – задняя и передняя поверхности зубьев.

25.3. Конструкции разверток

Развертки применяются для чистовой обработки точных отверстий. Припуск на сторону под развертывание обычно не превышает 0,01–0,05 мм.

Развертки разделяют:
в зависимости от назначения – на ручные и машинные;
по форме обработанных отверстий – на цилиндрические и конические;
по конструкции зубьев – на цельные, сварные (или припайные) и с механическим креплением зубьев.

Мелкоразмерные развертки диаметром до 3 мм бывают полукруглые (рис. 25.4, *a, б*) и многогранные (рис. 25.4, *в–e*). Режущие лезвия с полукруглым сечением рабочей части просты в изготовлении и обеспечивают удовлетворительные условия резания. Недостатками являются увод разверток в отверстия и малая их прочность.

Развертки трех- и, особенно, пятигранного поперечного сечения (рис. 25.4, *в–д*) имеют большую прочность рабочей части. Однако наибольшее использование при обработке отверстий диаметром 1,5–3 мм имеют пятизубые (пятиканавочные) развертки (рис. 25.4, *e*). Конические развертки применяются для получения отверстий с различной конусностью.

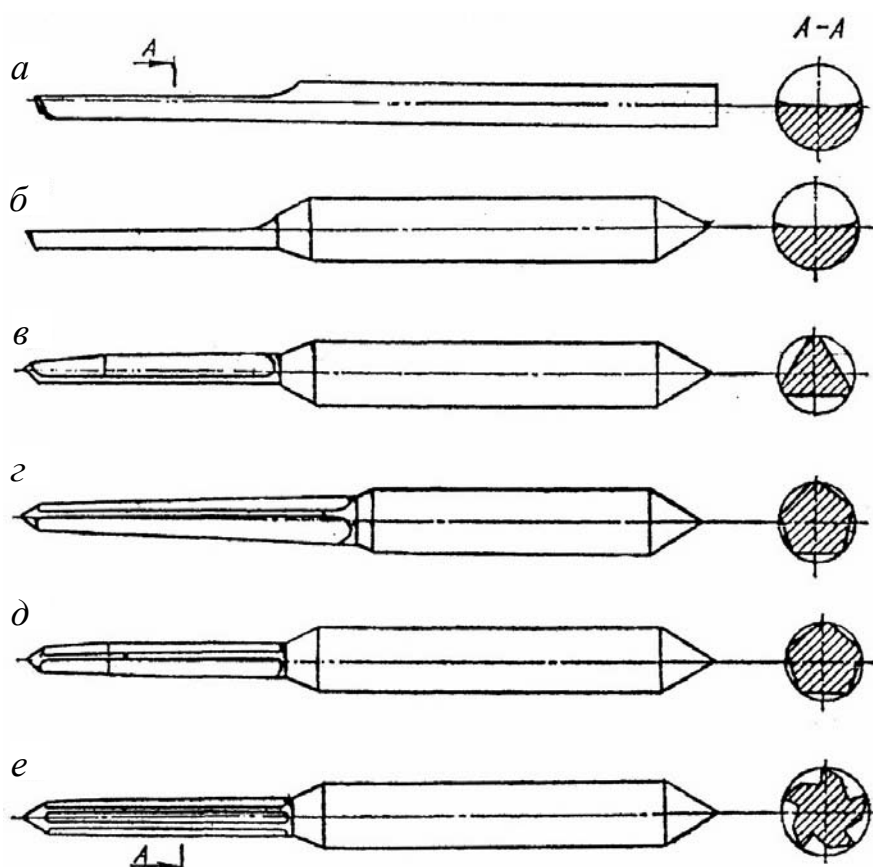


Рис. 25.4. Типы мелкоразмерных разверток

25.4. Инструментальная оснастка для станков с числовым программным управлением и автоматических линий

Инструментальная оснастка для автоматизированного оборудования включает собственно режущий инструмент, инструментальные оправки,

а также различные приспособления для автоматической подналадки режущего инструмента, контроля размеров деталей при обработке, автоматической смены инструмента и других операций.

На сравнительно простых станках-автоматах (вертикально-сверлильных, вертикально- и продольно-фрезерных, а также токарных автоматах) автоматическая смена инструментов производится с помощью револьверных головок. При большом количестве инструментов (100 и более) применяются инструментальные магазины различной конструкции.

К режущим инструментам для автоматизированного оборудования кроме общих (обеспечение необходимой формы, размеров и шероховатости обработанной детали) предъявляются следующие дополнительные требования: обеспечение размерной стойкости инструмента, стабильность его работы на различных режимах, быстросменность и взаимозаменяемость.

Для уменьшения времени обработки деталей на автоматизированном оборудовании следует сокращать время на установку и закрепление инструмента на станке.

При разработке инструмента для автоматизированного оборудования необходимо стремиться к следующему:

1. Инструмент по возможности делать сборным с механическим креплением режущих пластин или с их напайкой.
2. Применять бесподналадочный инструмент, настраиваемый на требуемый размер вне станка, что исключает потери времени на настройку последнего.
3. Повышать размерную стойкость инструмента за счет периодического или непрерывного обновления его лезвий.
4. Автоматически подналаживать установку инструмента с целью компенсации его износа.

Для обеспечения повышенной стойкости инструмента для автоматизированных станков его изготавливают из более износостойких и прочных инструментальных материалов.

Производительной является обработка ротационными резцами и фрезами, оснащенными круглыми вращательными пластинками.

Другим способом увеличения размерной стойкости инструмента является использование автоматического подналадчика, который контролирует размер детали и перемещает инструмент в целях компенсации его износа.

Прогрессивным является внедрение измерительных средств не только после изготовления деталей, но и на промежуточных стадиях обработки.

Оснащение металлорежущих станков с числовым программным управлением измерительными головками позволяет выполнять промежуточный контроль деталей. Это дает возможность принимать решения о ходе обработки, не снимая детали со станка.

В современных станках-автоматах используются программы, оптимизирующие подачу. Эти программы анализируют траекторию инструмента и автоматически изменяют подачу, поддерживая постоянным объем удаля-

емого материала. Более высокая подача назначается там, где снимается небольшой припуск, и подача уменьшается в местах, где припуск увеличивается. Оптимизация подачи повышает срок службы станка и инструмента, а также обеспечивает улучшение качества поверхности и точности обработки за счет снижения отжатий инструмента.

Глава 26. ПРОТЯГИВАНИЕ, ПРОШИВАНИЕ, СТРОГАНИЕ И ДОЛБЛЕНИЕ. РЕЗЬБООБРАЗОВАНИЕ И АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

26.1. Обработка протягиванием и прошиванием

Протяжки и прошивки предназначены для обработки внутренних и наружных поверхностей любой конфигурации с точностью по 7–9-му квалитетам и шероховатостью поверхностей с Ra до 1,25–0,20 мкм. Их можно отнести к разряду комбинированных инструментов, которыми последовательно проводят черновую и чистовую обработку.

Различают операции протягивания и прошивания. При протягивании инструмент, представляющий собой длинный стержень (рис. 26.1, а) или плиту с постепенно увеличивающимися по высоте зубьями (рис. 26.1, в), работает на растяжение, а прошивка (рис. 26.1, б) проталкивается через отверстие и работает на сжатие и изгиб.

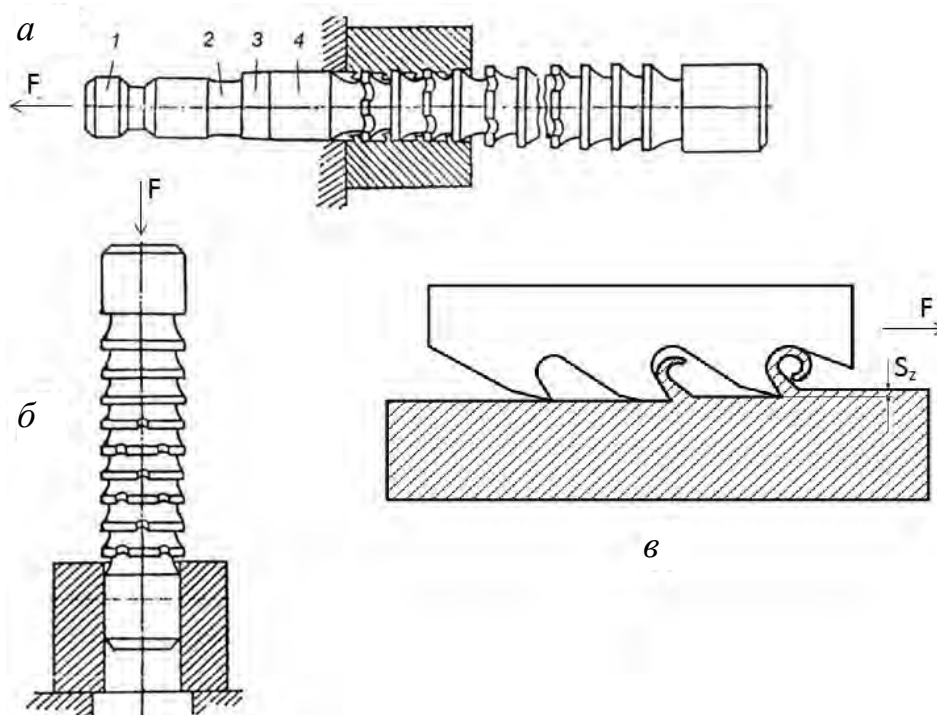


Рис. 26.1. Схема работы протяжки и прошивки

Прошивка обычно короче протяжки, имеет меньшие технологические возможности и реже применяется.

Протяжки и прошивки – это многозубые инструменты, совершающие одно главное движение – прямолинейное перемещение относительно обрабатываемой детали. Удаление припуска обеспечивается за счет того, что каждый последующий зуб инструмента выше предыдущего на некоторую величину s_z , называемую *подъемом на зуб* (подача, см. рис. 26.1, в). Величину подачи в процессе эксплуатации протяжки и прошивки изменить нельзя, она заложена в самой конструкции. Процесс протягивания и прошивания производительнее всех остальных методов лезвийной обработки. Например, протягивание плоскостей в 5–10 раз производительнее фрезерования, а протягивание отверстий производительнее развертывания в 10–15 раз.

Протяжки и прошивки разделяют по назначению на две большие группы: внутренние протяжки, используемые для обработки отверстий разного профиля (замкнутых контуров), и наружные протяжки, предназначенные для обработки открытых поверхностей (незамкнутых контуров).

Протяжки и прошивки каждой из этих групп дополнительно можно подразделить:

- а) по форме обрабатываемых поверхностей (круглые, плоские и фасонные, шлицевые, многогранные и т. д.);
- б) конструкции (цельные и сборные);
- в) режущему материалу (быстрорежущие и твердосплавные).

Протяжка состоит из рабочей и вспомогательной частей. Последняя включает (см. рис. 26.1, а) хвостовик 1, шейку 2, переходный конус 3 и направляющую часть 4, которая обеспечивает центрирование и направление протяжки при вхождении режущих зубьев в контакт с обрабатываемой заготовкой.

Рабочая часть протяжки включает в себя секции черновых, переходных и чистовых режущих, а также калибрующих и выглаживающих зубьев. Черновыми зубьями срезается основная часть припуска под протягивание.

26.2. Особенности обработки строганием и долблением

Процесс строгания осуществляется на строгальных станках с прямолинейным главным движением стола или инструмента. Строгальные станки делятся на поперечно- и продольно-строгальные. У продольно-строгальных станков (рис. 29.2, б) главное (возвратно-поступательное) движение со скоростью v имеет стол с закрепленной на нем заготовкой, а движение подачи s – инструмент (резец). У поперечно-строгальных станков (рис. 29.2, а) – наоборот: главное возвратно-поступательное движение имеет резец, закрепленный в ползуне станка, а движение подачи – стол, на котором крепится заготовка. Размерность подачи s – мм/дв. ход.

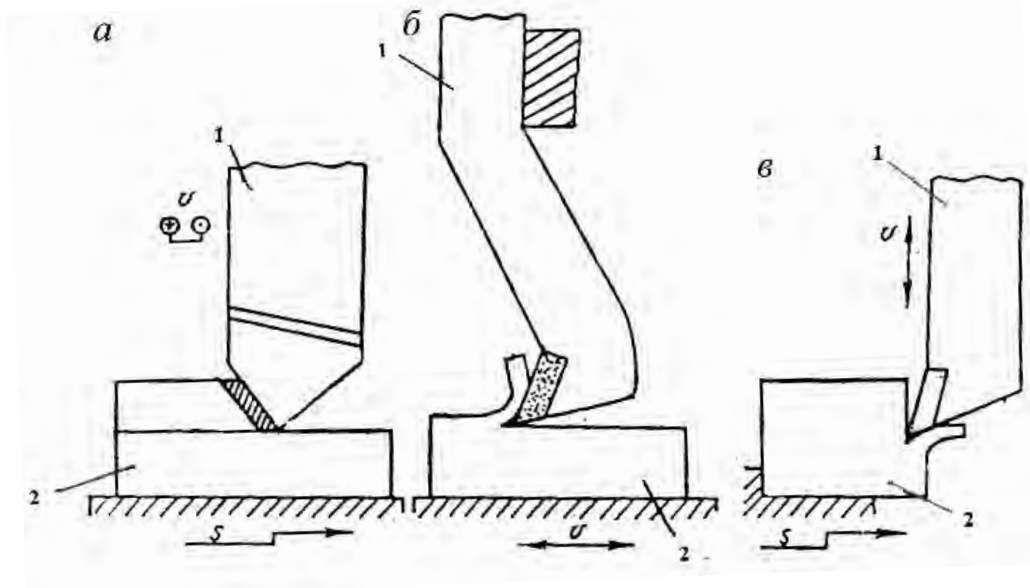


Рис. 26.2. Схема работы строгальных и долбежных станков

У строгальных станков имеется рабочий ход, во время которого происходит процесс резания, и холостой (обратный) ход, когда заготовка или резец перемещаются в обратном направлении без резания металла. Для уменьшения времени на обработку скорость холостого хода у строгальных станков больше скорости рабочего хода.

Работа резца сопровождается циклическим изменением тепловой (во время обратного хода резец охлаждается) и силовой нагрузок с резким их изменением на входе и выходе резца из работы. В эти моменты резец испытывает удар, что требует повышенной его жесткости и прочности.

Характерной особенностью строгальных резцов является изогнутая ось стержня (рис. 26.3, б). В результате этого вершина резца во время его изгиба под действием сил резания отходит от обработанной поверхности, перемещаясь по дуге радиусом R . В случае прямого стержня (рис. 26.3, а) радиус R больше вылета резца l , поэтому при изгибе последний внедряется в обработанную поверхность и повреждает ее. При этом вершина твердосплавного резца может сколоться.

Разновидностью строгания является долбление (рис. 26.2, в), которое осуществляется на долбежных станках, где резец совершает возвратно-поступательное движение со скоростью v в вертикальной плоскости, а заготовка имеет прерывистое движение подачи s в горизонтальной плоскости. Долблением на деталях получают пазы и шлицы, в том числе внутренние.

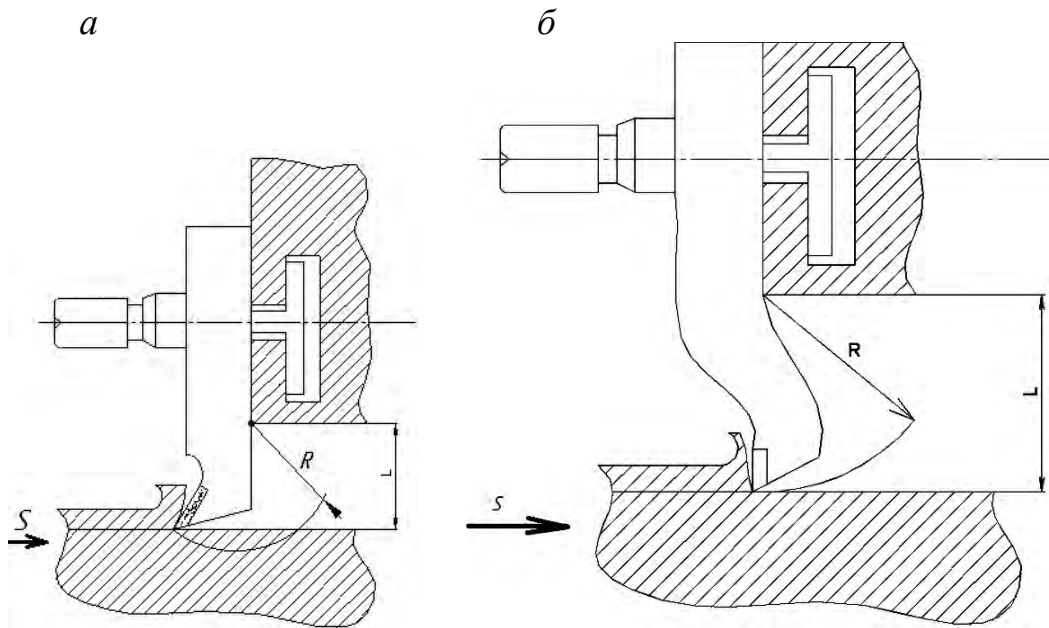


Рис. 26.3. Работа строгального резца с прямым (а) и изогнутым (б) стержнем

26.3. Способы получения резьб и применяемые инструменты

Образование резьбы на деталях из металла производится нарезанием или накатыванием. Для нарезания внутренней резьбы применяются метчики, наружной – резбонарезные резцы, плашки и резбонарезные головки. При накатывании резьбы используются накатные плашки и ролики, а также резьбонакатные головки.

Для повышения точности предварительно нарезанных или накатанных резьб выполняют резьбошлифование. Режущим инструментом для шлифования резьб служат одно- или многониточные абразивные круги (рис. 26.4, а, б). Последние обеспечивают большую производительность, но меньшую точность резьбы.

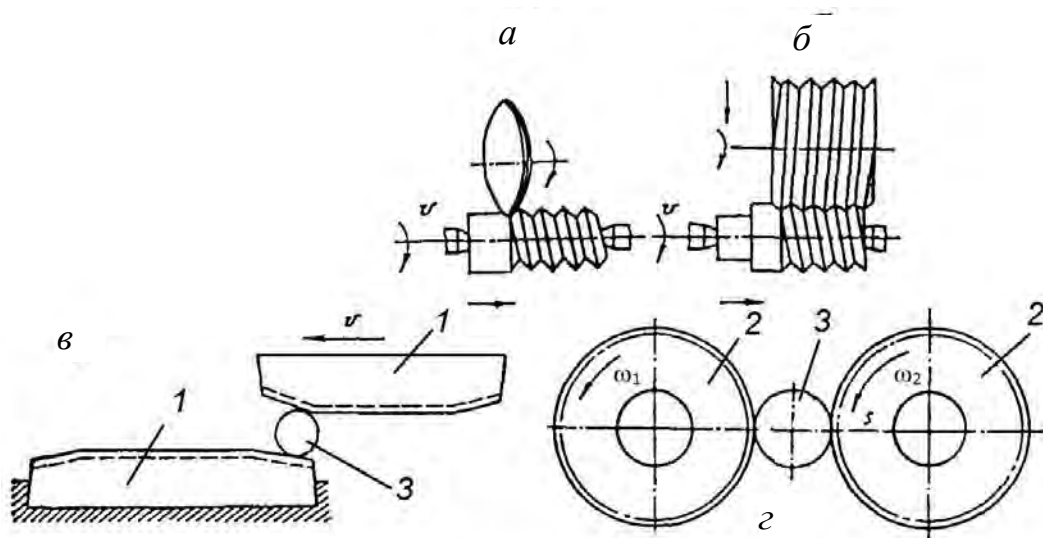


Рис. 26.4. Методы получения резьб

Получение резьбы накатными инструментами происходит за счет пластической деформации вращающейся заготовки при воздействии на нее накатных плашек 1 (рис. 26.4, в) и роликов 2 (рис. 26.4, г), которым сообщают соответственно поступательное v и вращательное ω_1 и ω_2 движения (на рис. 26.4, в и г поз. 3 – деталь).

26.4. Абразивная обработка

Абразивный метод окончательной обработки включает операции предварительного и чистового шлифования, а также отделочные операции, такие как хонингование, суперфиниширование, притирка, доводка и полирование. Полирование осуществляется для уменьшения шероховатости обработанной поверхности, а остальные виды абразивной обработки являются размерными, т. е. при их применении обеспечивается требуемая точность размеров. При чистовом шлифовании получают детали 6–7-го квалитетов точности с шероховатостью $Ra = 0,02$ мкм.

Абразивная обработка – процесс резания металлов и неметаллических материалов с помощью абразивных, алмазных, эльборовых и других зерен, которые обладают высокой твердостью и имеют режущие грани. Зерна соединены специальным связующим веществом в шлифовальные круги, головки, сегменты, бруски или наклеены на ленты. При абразивной обработке применяются также пасты и порошки.

В реальном процессе шлифования примерно 85–90 % зерен абразивного инструмента не режет, а деформирует и наклепывает поверхностный обрабатываемый слой.

Поскольку абразивные зерна расположены в теле круга хаотически, то при его вращении форма режущего контура (след резания) непрерывно изменяется, что приводит к получению сравнительно малой шероховатости поверхности, которая принимает признаки полированной. Полирующий эффект оказывает также и связка абразивного круга.

Применяются следующие методы шлифования:

- 1) наружное (рис. 26.5, а) и внутреннее (26.5, б) круглое с продольной S и поперечной S_n подачами;
- 2) бесцентровое (26.5, в);
- 3) плоское периферией (26.5, г) и торцом (26.5, д) круга;
- 4) специальное (резьбошлифование).

Припуск на сторону при шлифовании 0,15–0,7 мм. Припуск на предварительное шлифование составляет 60–80 % общего припуска.

Окружные скорости шлифовальных кругов на керамической связке не превышают 30–35, а на бакелитовой – 35–40 м/с. Круги на специальной высокопрочной связке допускают скоростное шлифование ($v = 50$ м/с и выше).

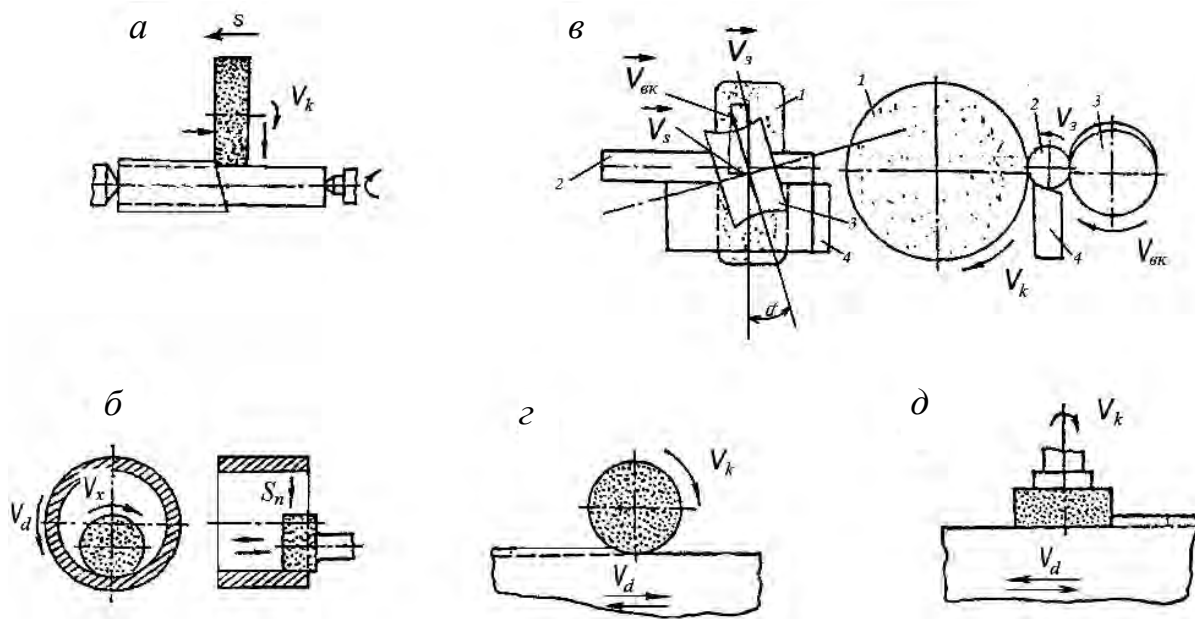


Рис. 26.5. Методы шлифования

Внутреннее круглое шлифование протекает в более тяжелых условиях, чем наружное. Это связано с малой жесткостью шпинделя и недостаточным проникновением СОЖ в зону резания. Поэтому внутреннее шлифование производится с параметрами режимов резания, в два раза меньшими, чем наружное.

При бесцентровом наружном шлифовании (рис. 26.5, в) обрабатываемая заготовка 2 опирается на упор 4 и проходит между шлифующим 1 и ведущим 3 кругами. Продольная подача заготовки вдоль ее оси обеспечивается за счет установки ведущего круга под углом $\alpha = 1^\circ$. Линейная скорость ведущего круга $v_{вк}$ раскладывается на скорость v_3 вращения заготовки и скорость v_s продольной подачи.

При плоском шлифовании периферией шлифовальный круг вращается, а заготовка (стол) совершает возвратно-поступательное движение. Если ширина круга меньше ширины обрабатываемой поверхности, то шлифовальный круг или стол имеют также поперечную подачу s .

Значительное повышение производительности процесса шлифования (в 1,5–2 раза) обеспечивается за счет увеличения скоростей резания до 50–80 м/с. При этом абразивное зерно круга в единицу времени успевает нанести на шлифуемую поверхность большее количество резов (царапин), в связи с чем силы, действующие на каждое зерно, уменьшаются, что позволяет догрузить их за счет увеличения глубины шлифования и подачи. При скоростном шлифовании уменьшается шероховатость обработанной поверхности и расход шлифовальных кругов снижается в среднем на 40 %.

Глава 27. ОБРАБОТКА ПЛАСТМАСС РЕЗАНИЕМ

27.1. Физические основы резания пластмасс

При обработке пластмасс на режущий клин инструмента действуют силы, приложенные, как и при обработке металлов, к передней и задней его поверхностям. Однако соотношение этих сил иное, чем при обработке металлов. Вследствие увеличенного упругого последействия пластмасс сила, действующая на заднюю поверхность зуба инструмента, превосходит силу на передней поверхности. В целом же силы резания при обработке пластмасс в 10–20 раз меньше, чем при обработке металлов. Эти силы зависят от свойств материала инструмента и его геометрических параметров. Уменьшение силы резания в два–пять раз наблюдается при точении алмазными резцами по сравнению с точением твердосплавными. Сила резания уменьшается также с увеличением переднего угла резца.

При обработке резанием пластмасс, как и при обработке металлов, выделяется теплота. Однако при обработке пластмасс основная часть теплоты (до 90 %) из-за низкой их теплопроводности переходит в инструмент, только 8 % в деталь и около 2 % отводится со стружкой. В связи с этим при обработке пластмасс инструмент интенсивно нагревается, поэтому он должен быть изготовлен из более тепло- и износостойкого инструментального материала (твердый сплав, алмаз). При температуре 70–100 °С на поверхностях термопластичных пластмасс уже происходят оплавление обработанной поверхности и налипание стружки на зубья инструмента. В результате обработанная поверхность получается с задирами и с искаженными формой и размерами.

Снижение температуры в зоне резания может быть достигнуто:

- 1) полированием рабочей части инструмента, что уменьшает силы трения между его поверхностями и обрабатываемым материалом;
- 2) использованием алмазных инструментов, имеющих уменьшенный коэффициент трения с обрабатываемым материалом;
- 3) выбором инструментов с увеличенным и задним и передним углами;
- 4) подбором параметров режима резания с учетом того, что наибольшее влияние на температуру в зоне резания оказывает скорость резания и меньшее – подача и глубина резания;
- 5) охлаждением зоны резания сжатым воздухом или СОЖ.

В качестве инструментального материала при обработке пластмасс применяются быстрорежущая сталь, твердый сплав, алмаз и рубин.

27.2. Обработка пластмасс резанием лезвийным инструментом

27.2.1. Разрезка и точение пластмасс

Для производства деталей из пластмасс применяются заготовки в виде листов, прутков и отливок различной формы. Листы малой толщины

(до 3 мм) разрезаются ножовкой, дисковой и ленточной пилами, рычажными и гильотинными ножницами, абразивными или алмазными кругами. Также при разрезке используются струя воды под давлением, ультразвуковой и тепловой методы. В последних двух случаях применяются ультразвуковой вибратор и струя нагретого воздуха.

Разрезку из толстых листов и круглых заготовок можно производить на металло- и деревообрабатывающих станках.

При точении обработка осуществляется либо на токарных, либо на специализированных станках. Параметры режима резания при точении устанавливаются в зависимости от материала режущей части резцов. Резцами из быстрорежущей стали пластмассы обрабатывают на сравнительно низких скоростях резания, алмазными резцами – на высоких (до 50–70 м/мин).

Токарные резцы для обработки пластмасс по сравнению с обычными резцами имеют большие передний и задний углы, а также меньшую шероховатость рабочей поверхности.

27.2.2. Обработка пластмасс фрезерованием

При фрезеровании пластмассовых деталей во избежание расслаивания, появления сколов и разломачивания пластмасс направление вращения фрезы должно совпадать с направлением подачи заготовки.

Для фрезерования термопластичных пластмасс применяются отрезные фрезы из быстрорежущей стали (рис. 27.1, а), а для терморезистивных – фрезы, оснащенные пластинками 1 твердого сплава, которые припаяны к сухарям 2 (рис. 27.1, б). Быстрорежущая фреза отличается от обычной большим диаметром, меньшей толщиной и большим числом зубьев.

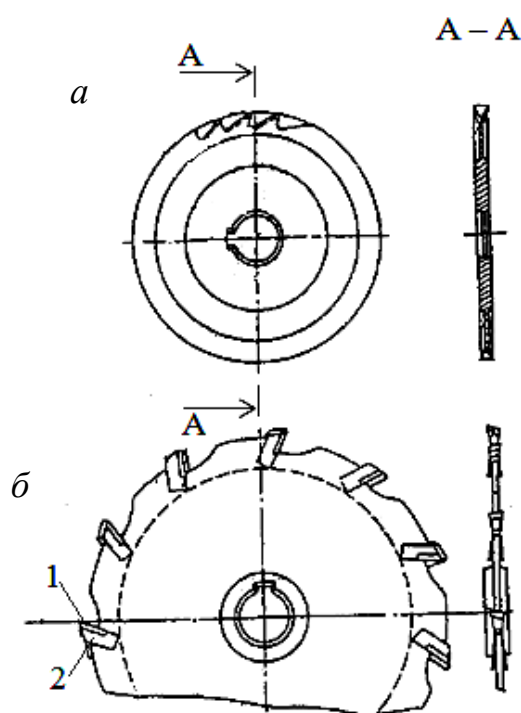


Рис. 27.1. Дисковые фрезы

При обработке сравнительно широких поверхностей деталей из пластмасс применяются цилиндрические быстрорежущие (рис. 27.2, *а*), твердосплавные цельные (рис. 27.2, *б*) и сборные твердосплавные фрезы (рис. 27.2, *в*).

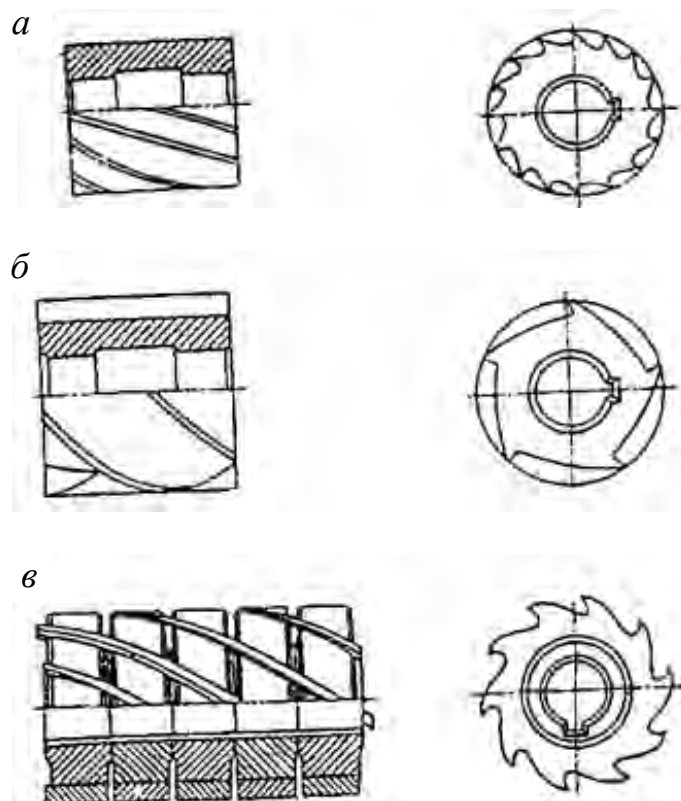


Рис. 27.2. Цилиндрические фрезы

27.2.3. Сверление отверстий и нарезание резьбы в пластмассовых деталях

Отверстия в пластмассах обрабатывают специальными сверлами различной конструкции, изготовленными из быстрорежущей стали, твердого сплава и алмазов. Режимы резания при сверлении пластмасс, а также конструкция, геометрические параметры и заточка сверл принимаются в зависимости от условий обработки и приведены в специальных таблицах. Сверла для обработки пластмасс имеют уменьшенный по сравнению со сверлами для обработки металлов угол заборного конуса, что позволяет избежать образования сколов пластмасс на выходе сверла.

Получение резьбы на пластмассовых деталях осуществляется не только прессованием, но и режущими инструментами (резцами, метчиками, плашками, абразивными кругами и т. д.). В связи с чувствительностью некоторых пластмасс к концентрации напряжений профиль резьбы во впадинах должен иметь небольшое округление.

Для снижения сил трения при нарезания резьбы в пластмассовых деталях метчики имеют следующие отличительные особенности по сравнению с метчиками для нарезания резьбы в металлических деталях:

- 1) увеличенные по объему и полированные стружечные канавки;
- 2) шлифованный профиль резьбы;
- 3) меньшее число зубьев;
- 4) увеличенный на 0,05–0,13 мм диаметр.

Глава 28. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ РАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

28.1. Электроэрозионная обработка

Данный метод используется при изготовлении деталей из твердых сплавов, жаропрочных, хрупких и других токопроводящих материалов, обработка которых на металлорежущих станках затруднена, а иногда невозможна.

При электроэрозионной обработке разрушение материала происходит не за счет резания, а путем электрической эрозии (разрушения), которая представляет собой направленный выброс металла под действием электрического разряда.

В процессе электроэрозионной (электроискровой) обработки используют как профилированный (рис. 28.1, *а*), так и непрофилированный (в виде проволоки, рис. 28.1, *б*) инструменты. При обработке больших заготовок обычно применяют медную проволоку диаметром 50–100 мкм, а для изготовления прецизионных деталей – вольфрамовую диаметром менее 6 мкм.

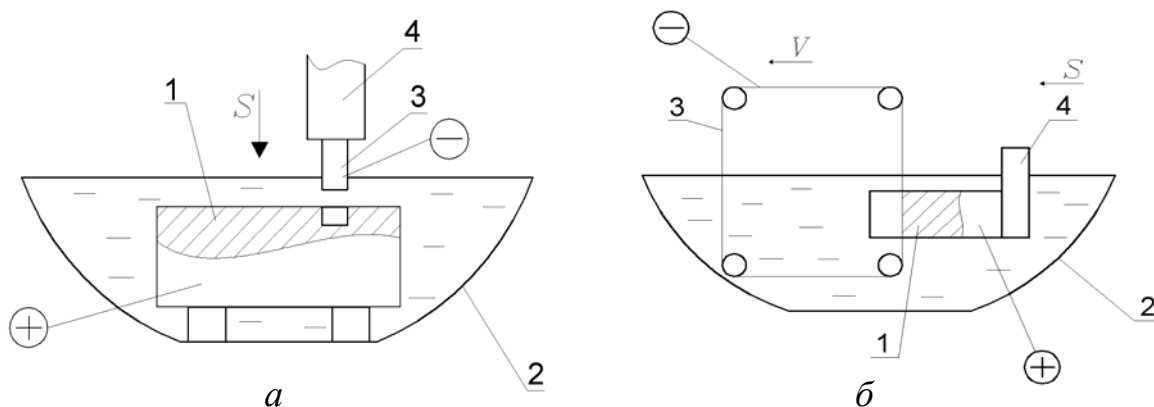


Рис. 28.1. Схема электроэрозионной обработки

Принцип электроэрозионной обработки заключается в следующем. Электрод-инструмент 3 закрепляется в держателе 4. Обрабатываемая деталь 1 помещается в изолированную ванну 2, заполненную жидкостью, не проводящей ток (керосин, промышленные масла). Под действием электронов, вырывающихся с поверхности катода (инструмента), происходит постепенное разрушение анода (детали). При этом мгновенная температура разряда достигает 10000 °С. Инструмент в процессе обработки перемещается со скоростью подачи s .

На основе электрической эрозии разработана анодно-механическая обработка, которая применяется при разрезке заготовок из труднообрабатываемых материалов (нержавеющих, кислотостойких и высоколегированных сталей), при безабразивном затачивании твердосплавного инструмента, а также для шлифования и хонингования. В данном случае (рис. 28.2) обработка ведется в проводящей ток жидкой среде, называемой электролитом.

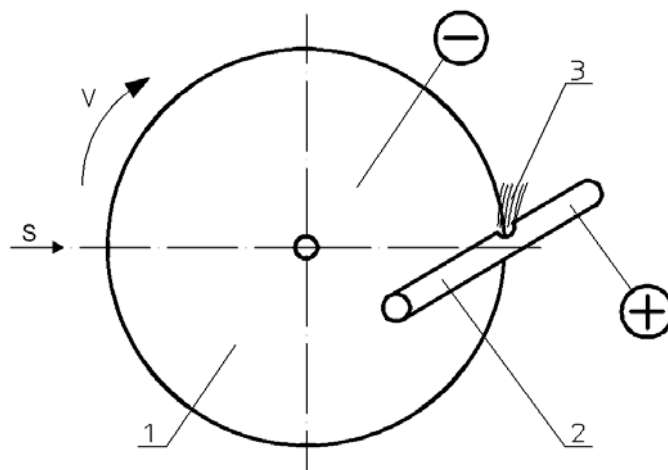


Рис. 28.2. Анодно-механическая обработка

Подаваемый в пространство между инструментом 1 (катод) и заготовкой 2 (анод) электролит 3 растворяет металл (*электролитическая эрозия*), образуя на его поверхности тонкую оксидную пленку небольшой прочности. Эта пленка механически удаляется инструментом, которому сообщается вращение – главное движение со скоростью v и движение подачи s . На месте удаленной пленки вновь образуется пленка, которая удаляется при дальнейшем движении инструмента. При удалении пленки в местах неровностей (выступов) происходят искровые дуговые разряды (*электрическая эрозия*), ускоряющие процесс резания. Таким образом, в данном случае имеет место комбинация электрофизического и электрохимического процессов.

28.2. Ультразвуковая обработка

Ультразвуковой метод обработки, в отличие от электроэрозионного, пригодного для обработки только токопроводящих материалов, может быть использован также для получения деталей из непроводящих ток хрупких и твердых материалов (кварца, стекла, алмаза, кремния, фарфора, рубина и др.). Пластичные материалы (свинец и др.) ультразвуковым методом практически не обрабатываются. Метод основан на ударном воздействии абразивных частиц, получающих кинетическую энергию от ультразвуковых колебаний инструмента.

Существуют две разновидности ультразвуковой обработки. В первом случае обработка детали производится в абразивной суспензии (вода с карбидом бора), которой сообщаются ультразвуковые колебания. Обычно этот метод используется при декоративном шлифовании и снятии заусенцев.

Более перспективной является размерная (вторая разновидность) ультразвуковая обработка. При ее использовании движения абразивным зернам сообщаются торцом инструмента 2 (рис. 28.3), который через концентратор 3 жестко связан с преобразователем (вибратором) 4. Сердечник преобразователя изготовлен из пакета пластин, материал которых изменяет свои размеры в переменном магнитном поле (магнитострикционный эффект). Этим свойством обладают железо, кобальт, никель и их сплавы. На катушку преобразователя от генератора 5 подают электрические колебания ультразвуковой частоты 16–30 кГц, которые преобразуются в механические колебания инструмента той же частоты. Колебательная система прикреплена к шпинделю, который вместе с инструментом 2 перемещается по стрелке А в сторону обрабатываемой заготовки 1. В зону обработки подается абразивная суспензия 6.

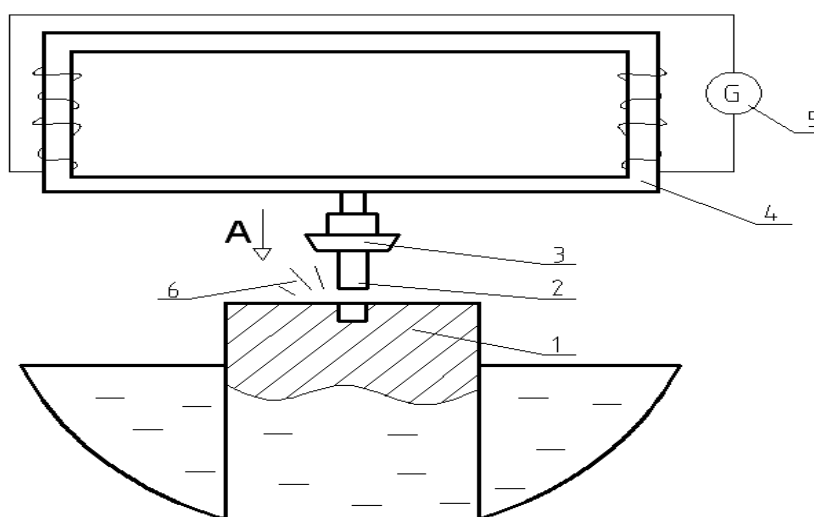


Рис. 28.3. Схема установки для ультразвуковой обработки

Ультразвуковая обработка обеспечивает получение размеров по 7–8-му квалитетам точности с шероховатостью обработанных поверхностей $Ra = 0,8–0,2$ мкм.

28.3. Электрохимическая и электронно-лучевая обработка. Обработка излучением лазера

Электрохимическая обработка (ЭХО) позволяет обрабатывать (полировать) электропроводные материалы практически любой твердости, при этом отсутствует вредное действие тепла на поверхность детали и инструмента и не образуется наклепа.

Сущность ЭХО заключается в том, что при протекании постоянного тока между электродами, погруженными в электролит, происходит процесс анодного растворения (электролитическая эрозия), т. е. переход металла анода в раствор. В качестве анода при этой обработке принимается деталь, а в качестве катодов – токопроводящие материалы, не поддающиеся разрушению электролитом (нержавеющая сталь, медь, свинец).

В электрохимическом полировании металлический катод-инструмент 1 (рис. 28.4) с неэлектропроводными притирами 2 устанавливают над анодом – заготовкой 3. При протекании тока между инструментом и заготовкой, помещенными в электролит, на поверхности последней образуется хрупкая пленка, замедляющая процесс растворения. Для удаления пленки в раствор 4 вводят мелкодисперсный абразив (электрокорунд, окись хрома), шаржирующий эластичные неэлектропроводные притиры (из резины или другого пористого материала). Такое полирование называют еще анодно-абразивным.

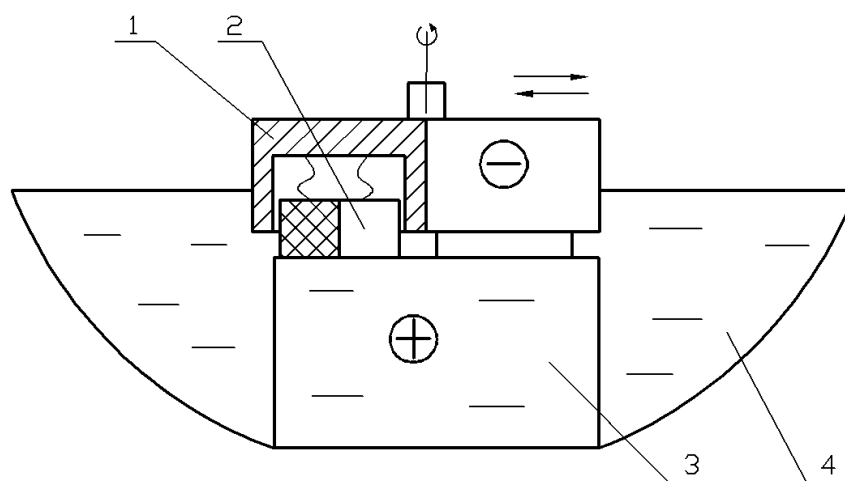


Рис. 28.4. Схема установки для электрохимической обработки

При электронно-лучевой обработке изделие помещают в герметическую камеру, в которой обеспечивают вакуум. Специальное устройство (электронная пушка) создает остро сфокусированный пучок электронов, который ускоряется в вакууме до скорости порядка 100 км/с. Кинетическая энергия электронов, соударяющихся с деталью, превращается в теплоту, при этом в зоне обработки температура достигает приблизительно 6000 °С и металл испаряется.

Обработка излучением лазера целесообразна при диаметре отверстия (ширине щели) от нескольких микрометров до 0,5 мм, когда другие методы неприемлемы или недостаточно производительны. Процесс изготовления отверстия можно рассматривать как удаление материала за счет его испарения из зоны, на которой сфокусировано излучение лазера.

28.4. Плазменная обработка

Плазма – ионизированный газ, в котором объемные плотности положительных и отрицательных электрических зарядов практически одинаковы (условие квазинейтральности). Плазма образуется при электрических разрядах в газах (газоразрядная плазма) в процессе нагрева газа до температуры, достаточной для протекания термической ионизации, и отличается от обычного газа рядом признаков, позволяющих считать ее особым, «четвертым» (после твердого, жидкого и газообразного) состоянием вещества. В частности, для плазмы характерно взаимодействие с внешними электрическими и магнитными полями, что обусловлено ее высокой электрической проводимостью. Плазму считают «горячей» (высокотемпературной), если температура ее около 10^6 – 10^7 К. Широкое применение в технике получила «холодная» (низкотемпературная) плазма (10^3 – 10^4 К). Такая плазма образуется в газоразрядных приборах и используется в плазменных генераторах для сварки и резки металлов, а также для нанесения покрытий.

Плазменная резка – резка металлов и неметаллических материалов с использованием низкотемпературной плазмы. Плазменная резка может осуществляться с помощью плазменной струи или плазменной дуги. В первом случае (рис. 28.5, а) плазма, создаваемая в разряде между анодом 3 и катодом 1 плазматрона, истекает из разрядной камеры в виде струи 5, которая служит режущим инструментом (применяется для резки неэлектропроводных материалов). В случае электропроводного материала плазменная дуга горит между катодом 1 плазматрона и разрезаемым материалом 6 (рис. 28.5, б), который в этом случае выполняет роль анода.

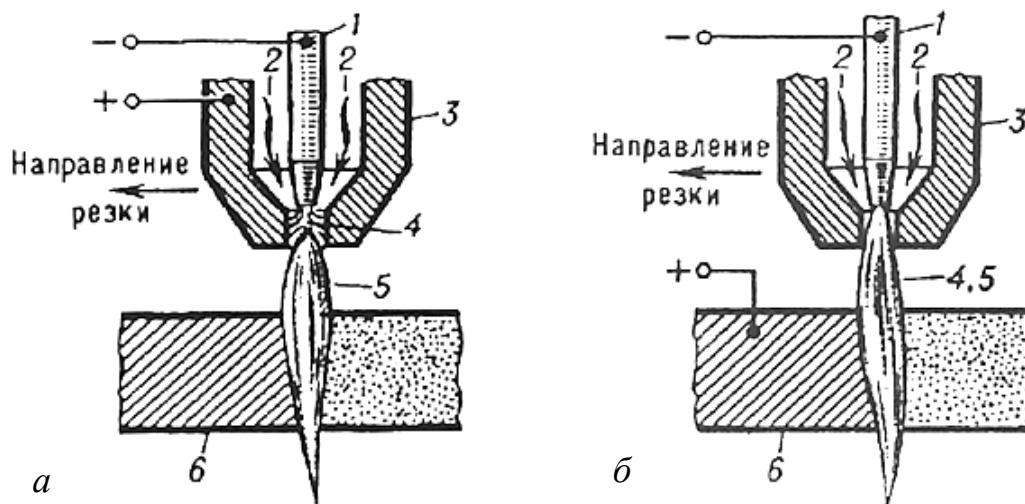


Рис. 28.5. Схема плазменной резки:

а – резка плазменной струей; б – резка дугой прямого действия; 1 – катод; 2 – газ; 3 – анод; 4 – электрическая дуга; 5 – плазма; 6 – разрезаемый материал

Плазменная сварка – сварка плавлением, при которой соединяемые детали нагревают плазменной дугой, сжатой потоком газа или внешним

магнитным полем (рис. 28.6, *а*), либо посредством плазменной струи (рис. 28.6, *б*). При плазменной сварке дугой объект сварки включается в электрическую сварочную цепь, где выполняет роль анода. При плазменной сварке с помощью струи объект сварки не подключается к источнику тока и нагревается за счет теплоты плазменной струи.

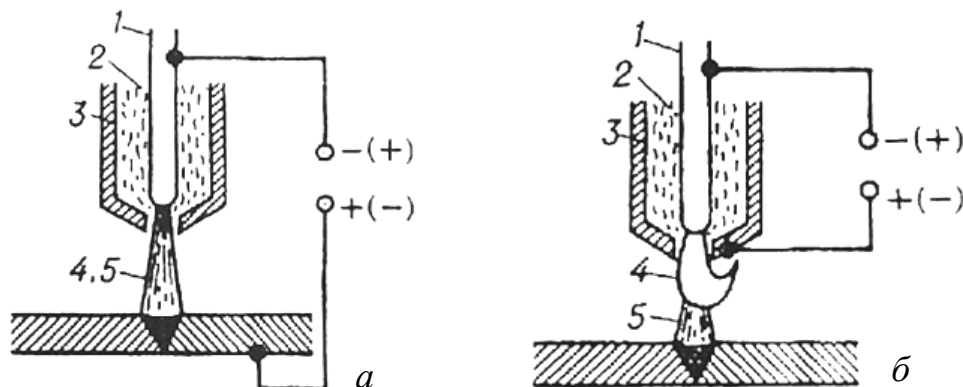


Рис. 28.6. Плазменная сварка дугой:

а – прямого действия; *б* – косвенного действия;

1 – неплавящийся электрод; 2 – струя газа (аргон, гелий, азот, водород);

3 – охлаждаемое водой медное сопло; 4 – дуги; 5 – струя плазмы

Нанесение покрытий (напыление) производится для защиты деталей, работающих при высоких температурах, в агрессивных средах или подвергающихся интенсивному механическому воздействию. Материал покрытия (тугоплавкие металлы, окислы, карбиды, силициды, бориды и др.) вводят в виде порошка (или проволоки) в плазменную струю, в которой он плавится и со скоростью около 100–200 м/с в виде мелких частиц (20–100 мкм) распыляется на поверхность изделия.

28.5. Магнитно-абразивная обработка

В основе процесса магнитно-абразивной обработки (МАО) лежит механический и механохимический съем металла и его окислов с поверхности обрабатываемой детали, а также сглаживание микронеровностей путем их пластического деформирования зернами магнитно-абразивного порошка, который под воздействием постоянного магнитного поля увеличивает свою жесткость и прижимается к обрабатываемой поверхности, совершающей относительное движение. Подача СОЖ в зону обработки обеспечивает возникновение процесса электролиза, в результате которого растворяются поверхностный слой материала детали и ферромагнитная основа зерен порошка, т. е. СОЖ в данном процессе выступает как носитель поверхностно-активных веществ, а не как средство охлаждения детали. Анодное растворение поверхности металла обрабатываемой детали влияет на съем материала, а растворение ферромагнитной основы зерен порошка

обеспечивает вскрытие абразивных частиц и способствует увеличению их режущей способности.

На рис. 28.7 показана схема магнитно-абразивной обработки на примере доводки цилиндрических деталей. Обрабатываемую деталь 1 помещают между полюсными наконечниками 3 электромагнита 4 с определенными зазорами, в которые подают порошок 2, обладающий магнитными и абразивными свойствами. Электромагнит закреплен в яре 5. Механическим приводом заготовке детали сообщают вращательное и осциллирующее вдоль оси движения.

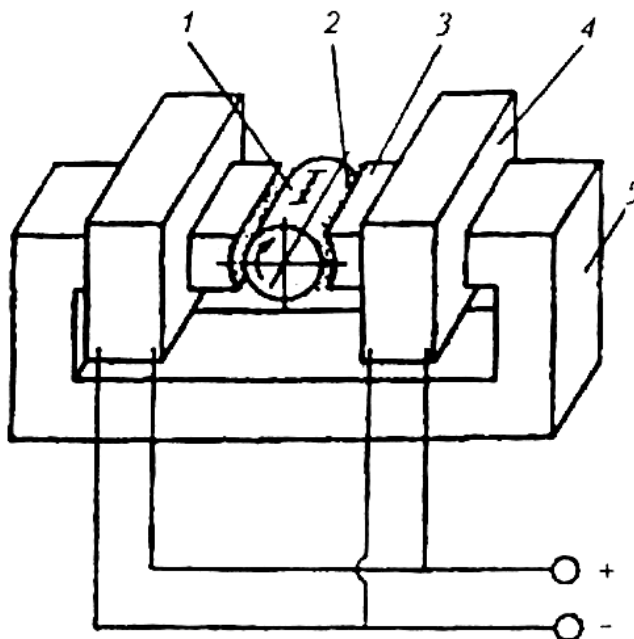


Рис. 28.7. Схема магнитно-абразивной обработки наружных поверхностей тел вращения

Силами магнитного поля зерна порошка удерживаются в рабочих зазорах, прижимаются к поверхности заготовки и производят ее обработку. В рабочие зазоры подается СОЖ (эмульсия, керосин и т. д.). В данном случае функции рабочего (прижимного) усилия, действующего на порошок, и его упругой связки выполняет энергия постоянного магнитного поля. Степень упругости «магнитной» связки легко регулируется изменением напряженности магнитного поля, что позволяет процессу МАО приближаться к шлифованию связанным или свободным абразивом и тем самым использовать преимущества первого и второго в одном рабочем цикле.

Используемые в качестве режущего инструмента при МАО порошки должны обладать не только абразивными, но и высокими магнитными свойствами.

Основным свойством магнитно-абразивных порошков является прочность соединения ферромагнитной и абразивной составляющих.

Технология получения магнитно-абразивных порошков на основе железа и электрокорунда белого, а также железа и тугоплавких соединений

заключается в смешивании исходных порошков, прессовании брикетов из смеси, их спекании и последующем измельчении в порошок.

28.6. Технология быстрого прототипирования

В настоящее время можно выделить три области использования технологий быстрого прототипирования:

- 1) изготовление различных макетов (прототипов);
- 2) изготовление инструмента (технологической оснастки) для традиционных производственных процессов (литья, штамповки) либо промежуточных средств для его производства. Такое направление носит название *быстрый инструмент*;
- 3) непосредственное изготовление деталей.

Одним из способов быстрого прототипирования (послойного изготовления трехмерных объектов) является лазерная стереолитография. Принцип работы установки для лазерной стереолитографии иллюстрирует рис. 28.8. Ванна, оборудованная подвижным столом 1, заполнена жидким фотополимером 2, который может затвердевать (полимеризоваться) под действием лазерного луча. В исходном положении поверхность стола находится ниже уровня жидкости на толщину слоя. Луч лазера 3, направляемый сканирующим зеркалом 4, засвечивает только те участки поверхности, где на текущем слое должен находиться материал. Освещенные участки поверхности фотополимера за 2–3 с затвердевают и прилипают к столу или к ранее выращенной части детали. По завершении обработки первого слоя стол опускается на глубину следующего слоя, а выравнивающая линейка 5 наносит тонкий слой жидкой смолы одинаковой толщины на ранее выращенную часть детали 6. Далее опять засвечиваются только те участки поверхности нового слоя, на которых должен находиться материал. Так, слой за слоем, и формируется деталь. По завершении построения готовая деталь промывается от остатков жидкой смолы, сушится и может быть дополнительно помещена в ультрафиолетовую камеру для ускорения полимеризации.

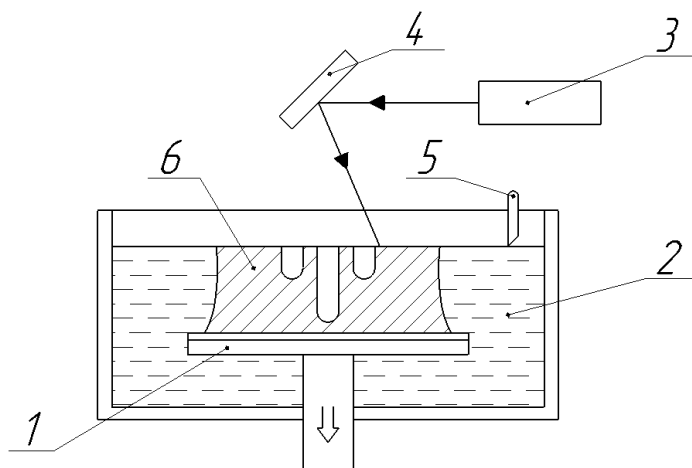


Рис. 28.8. Схема установки для стереолитографии

Установка трехмерной печати (3D Printing, 3DP) выращивает деталь из порошка, для соединения частиц которого между собой используется клей. На поверхность подвижной платформы 1 (рис. 28.9) при помощи ролика подачи 2 наносится тонкий равномерный слой порошка 3. Подвижная головка с соплами 4 сканирует поверхность слоя и разбрызгивает быстро застывающий клей 5 только на те участки поверхности, где на текущем слое должен находиться материал. В этих местах частицы порошка склеиваются между собой и с нижеследующим слоем, формируя таким образом деталь 6.

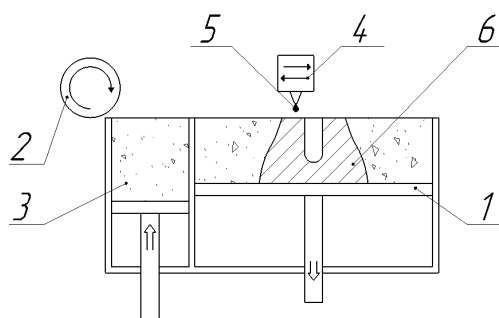


Рис. 28.9. Установка для трехмерной печати

Технологию моделирования распределением расплава (Fused Deposition Modelling, FDM) иллюстрирует рис. 28.10.

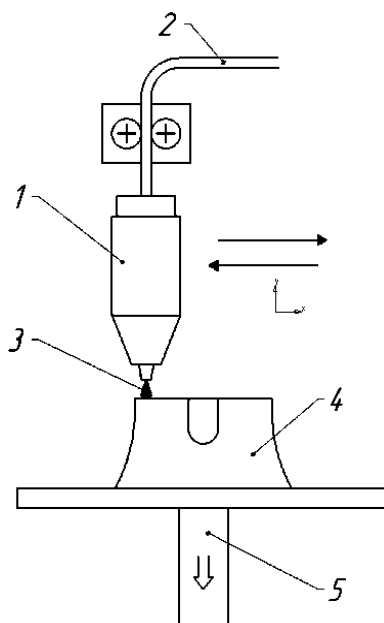


Рис. 28.10. Установка для моделирования распределением расплава

В нагревательную головку 1 со множеством сопел, которая перемещается по программе, подается нить 2 (или нити, шнуры) из термопласта. В головке нить плавится и отдельными каплями выбрасывается из сопел на нужный участок. Застывая, капельки пластика 3 привариваются к предыдущему слою. Головка перемещается над поверхностью детали 4, формируя очередной слой. Далее подвижный стол 5 опускается на толщину слоя, и цикл повторяется до завершения выращивания детали.

Глава 29. ИЗГОТОВЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ДЕТАЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

29.1. Изготовление корпусных деталей

29.1.1. Конструктивно-технологические характеристики

Корпусные детали в оптических приборах выполняют функцию базисных элементов. С их помощью соединяются и в пределах заданной точности взаимно располагаются все звенья прибора.

Наряду с требованием точности к обработке корпусных деталей предъявляются требования сохранения этой точности в течение всего периода эксплуатации прибора.

Условно корпусные детали можно разбить на следующие группы: коробчатые, рамочные, П-образные, Г-образные (кронштейны), трубчатые и др.

Характерной конструктивной особенностью корпусных деталей является наличие точно расположенных друг относительно друга отверстий и базовой поверхности.

Большинство корпусных деталей оптических приборов изготавливают из сплавов на основе термообработанного алюминия (Д1Т, Д16Т), титана, магния и др. Кроме того, корпусные детали изготавливают из сталей и чугуна, а для неответственных корпусных деталей применяют пластмассы.

Заготовки для корпусов получают различными способами: литьем, прессованием, сваркой или пайкой, комбинированным способом, когда отдельные элементы заготовки корпуса отливают, а затем их сваривают или соединяют пайкой.

Трудоемкость изготовления корпусных деталей существенно зависит от технологичности их конструкции, т. е. от правильного выбора материала детали, назначения оптимальных конструкторских баз, рациональной простановки размеров, оптимальной формы поверхностей и их расположения, заданной точности размеров и т. д.

При проектировании корпусных деталей рекомендуется обеспечить следующие технологические требования:

1. Корпусная деталь должна быть жесткой и прочной, чтобы при закреплении заготовки и в процессе ее обработки под воздействием силы резания не возникали деформации, вызывающие погрешности обработки.

2. В корпусных деталях нерабочие поверхности, где это возможно, желательно оставлять без механической обработки (во избежание вскрытия раковин), для получения товарного внешнего вида ограничиваясь только обдувкой песком.

3. Следует избегать наклонного расположения обрабатываемых поверхностей (особенно под разными углами).

4. Базовые поверхности корпусной детали должны иметь достаточный размер, обеспечивающий устойчивость закрепляемых на них деталей.

5. Обрабатываемые поверхности должны быть открыты и доступны для подхода режущего инструмента при врезании и на выходе.

6. Отверстия в корпусной детали должны иметь по возможности простую геометрическую форму без кольцевых канавок.

7. Основные отверстия должны быть сквозными, по возможности без пересечения с другими отверстиями и окнами.

8. Точные отверстия должны быть только во внешних стенках корпусных деталей. Наличие точных отверстий в перегородках нежелательно.

9. Крепежные отверстия корпусной детали должны быть стандартными, а их номенклатура (по диаметру) – минимальной.

29.1.2. Изготовление заготовок корпусных деталей

Литье является основным способом получения заготовок корпусов, при этом форму и размеры заготовок максимально приближают к готовым деталям, что уменьшает последующую механическую обработку.

Для изготовления заготовок (отливок) корпусных деталей применяют литье в землю, литье по выплавляемым моделям (технология быстрого прототипирования) и литье под давлением.

Литье в землю применяют главным образом для изготовления небольших серий крупногабаритных корпусов из сталей, чугунов и алюминиевых сплавов.

Литье по выплавляемым моделям назначают для получения деталей сложной конфигурации.

Процесс литья под давлением заключается в том, что расплавленный металл первоначально заливают в камеру литьевой машины, соединенную литниковыми каналами с замкнутой формующей полостью разъемной металлической формы. Затем под действием поршня металл с камеры машины принудительно перегоняется в полость формы, заполняет ее, затвердевает и образует отливку. При раскрытии формы отливку удаляют.

29.1.3. Механическая обработка корпусных деталей

Трудоемкость механической обработки корпусных деталей вызвана необходимостью обеспечения их высокой точности и стабильности размеров. Высокие требования к точности обязывают вести обработку поверхностей и основных отверстий в несколько этапов и на стадии окончательной обработки использовать точные станки и инструмент. Разделение механической обработки на черновые и чистовые операции обусловлено необходимостью уменьшить влияние деформаций заготовки на точность детали и износ прецизионного оборудования и на появление дополнительных внутренних напряжений в самом корпусе.

Одним из наиболее сложных и важных вопросов, решаемых при проектировании технологического процесса обработки корпусных деталей, является

ся назначение базирующих поверхностей. От решения этого вопроса зависят точность выполнения размеров, конструкция приспособлений и инструментов, а также общая трудоемкость обработки. При выборе базирующих поверхностей технологические и измерительные базы желательно совмещать с основными базами детали, т. е. осуществлять принцип единства баз.

При жестких требованиях к плоскостности после обработки на станках детали шабруют, а если помимо плоскостности необходимо обеспечить высокое качество поверхности (чистоту), их подвергают доводке.

Шабрением достигается плоскостность до 0,001 мм на длине 300 мм. Причем шабрение обеспечивает лучшее по сравнению со шлифованием прилегание поверхностей.

Доводкой достигается плоскостность 0,0006 мм на длине 300 мм. Доводку плоских поверхностей производят на притирочных плитах с помощью суспензии абразивного или алмазного порошков, а также пасты на их основе.

Обработка основных отверстий является наиболее сложной и трудоемкой частью технологического процесса изготовления корпусов. Эта обработка делится на черновую, чистовую и отделочную.

Перспективным при обработке корпусных деталей является применение пяти осевых станков, когда две поворотные оси используются для переориентации инструмента, а три линейные оси задействованы во время резания. Наклонив шпиндель по отношению к крутой стене обрабатываемой детали, можно сократить длину инструмента и соответственно провести обработку на более высоких режимах резания.

29.1.4. Стабилизирующая термическая обработка корпусных деталей

Термическая обработка заготовок корпусных деталей обеспечивает стабильность размеров и формы в условиях эксплуатации при переменной температуре.

Самопроизвольное изменение размеров механических деталей происходит из-за двух факторов: нестабильности кристаллической решетки (решетки бывают: центрированный куб, куб с центрированными гранями, гексагональная и др.) и структурного состояния материала (в зависимости от содержания углерода железоуглеродистые сплавы имеют следующие структурные составляющие, которые могут переходить друг в друга: аустенит, ледебурит, перлит, феррит и цементит, фосфидная эвтектика, графит); релаксации (выравнивания) остаточных внутренних напряжений, возникающих в деталях в процессе различных операций горячей и холодной обработки, а также при механосборочных работах.

Для обеспечения стабильности размеров деталей последние подвергают термической стабилизации. С этой целью вводят такие термические операции, как термическая обработка, обработка холодом, термоциклическая обработка.

Термическую обработку корпусной детали производят:

- 1) после получения заготовки (отливки, поковки и т. д.);
- 2) предварительной (черновой) и чистовой обработок;
- 3) окончательной обработки детали.

Первый вид термической обработки применяется с целью обеспечить однородные механические свойства и стабильное структурное состояние. Второй – снизить остаточные напряжения во всем объеме детали, а третий вид назначают только для высокоточных корпусных деталей.

Обработка холодом стальных корпусных деталей понижает содержание аустенита. Интервал температур обработки холодом –50–80 °С.

Термоциклическая обработка заключается в чередовании нагрева и охлаждения и применяется для стабилизации размеров деталей, материал которых содержит фазы (структурные составляющие) с резко отличающимися коэффициентами теплового расширения.

29.2. Контроль корпусных деталей

Контроль механическими методами

В корпусных деталях контролируют точность диаметров отверстий и линейных размеров, а также точность формы и расположения поверхностей.

Выбор методов и средств контроля производят с учетом точности детали, ее размеров и конфигурации, а также количества контролируемых элементов.

Диаметральные и линейные размеры, выполненные с высокой точностью, контролируют гладкими калибрами или микрометрическими инструментами. Аналогичные размеры, обработанные менее точно, контролируют шаблонами «на просвет» или универсальными измерительными инструментами (штангенциркулями, штангенрейсмусами и т. д.). Калибры и шаблоны позволяют оценить лишь соответствие размера его заданным предельным значениям без определения действительного размера.

Точность обработки резьбовых поверхностей также контролируют резьбовыми калибрами (пробками и скобами).

Наиболее простым способом контроля отклонения формы плоскостей (неплоскостности и непрямолинейности) является контроль при помощи поверочных линейек и плит. Поверочные линейки выпускают различных типов длиной от 80 до 500 мм двух классов точности (0-го и 1-го). Поверочные плиты выпускают пяти классов точности (01, 0, 1, 2 и 3) размерами от 250 × 250 до 400 × 1600 мм. Плиты изготавливают из чугуна с шаброванными рабочими поверхностями.

Сущность контроля прямолинейности и плоскостности линейками и плитами заключается в том, что контролируемую поверхность детали сравнивают с рабочей поверхностью плиты или линейки, которую принимают за эталонную плоскость или прямую. Это сравнение можно произво-

дить «на просвет» при контроле поверочными линейками и «на краску» при контроле плитами.

При контроле «на просвет» линейку рабочим углом устанавливают на контролируемую поверхность и на глаз оценивают просвет между ними. Невооруженный глаз способен обнаружить просвет, равный 2–5 мкм. Линейку устанавливают на контролируемую поверхность в диагональном и нескольких продольных и поперечных ее сечениях.

При проверке плоскостности «на краску» поверхность образцовой плиты покрывают тонким слоем краски и приводят в соприкосновение с контролируемой поверхностью. По распределению окрашенных пятен на контролируемой поверхности можно судить о расположении на ней «бугров» и «ям», но оценить величину неплоскостности нельзя.

Для контроля формы отверстий корпусных деталей в осевом сечении часто используют координатно-расточные станки. Для этого ось вращения вспомогательного поворотного стола, закрепленного на главном столе станка, совмещают с осью шпинделя. На поворотном столе закрепляют деталь в положении, при котором ось контролируемого отверстия по возможности точно совмещается с осью шпинделя. Затем поворотный стол поворачивают на некоторый заданный угловой шаг и в каждом положении стола с помощью индикаторного центроискателя, укрепленного на шпинделе станка, измеряют разность ΔR между значением радиуса отверстия в начале и вдоль его оси. По найденным значениям ΔR можно построить профиль отверстия в контролируемом сечении. Метод малопроизводительный, но универсальный и не требует специальных вспомогательных устройств и приспособлений.

На рис. 29.1 показаны схемы контроля отклонений от параллельности и перпендикулярности поверхностей с использованием индикаторов. Для контроля неперпендикулярности плоскостей деталь базовой поверхностью устанавливают на поверочную плиту, а контролируемой плоскостью прижимают к двум упорам приспособления (рис. 29.1, а), один из которых неподвижен, а другой является наконечником индикатора. Настройку индикатора осуществляют по эталонному угольнику. Разность показаний индикатора Δx при его настройке и контроле детали позволяет определить угол неперпендикулярности α плоскостей, измеренной на длине L :

$$\alpha = \Delta x / L.$$

Схема контроля отклонения от параллельности плоскостей корпусной детали на поверочной плите показана на рис. 29.1, б. Контроль сводится к измерению с помощью укрепленного на стойке индикатора разности высот детали H в точках I и II. Разность показаний индикатора равна непараллельности плоскостей детали на длине L в линейной мере.

По аналогичной схеме (рис. 29.1, в) контролируют непараллельность оси отверстия диаметром D плоскости Б. На трех последних схемах рис. 29.1 по-

ложения осей контролируемых отверстий определяются специальными оправками, с минимальными зазорами установленными в отверстия.

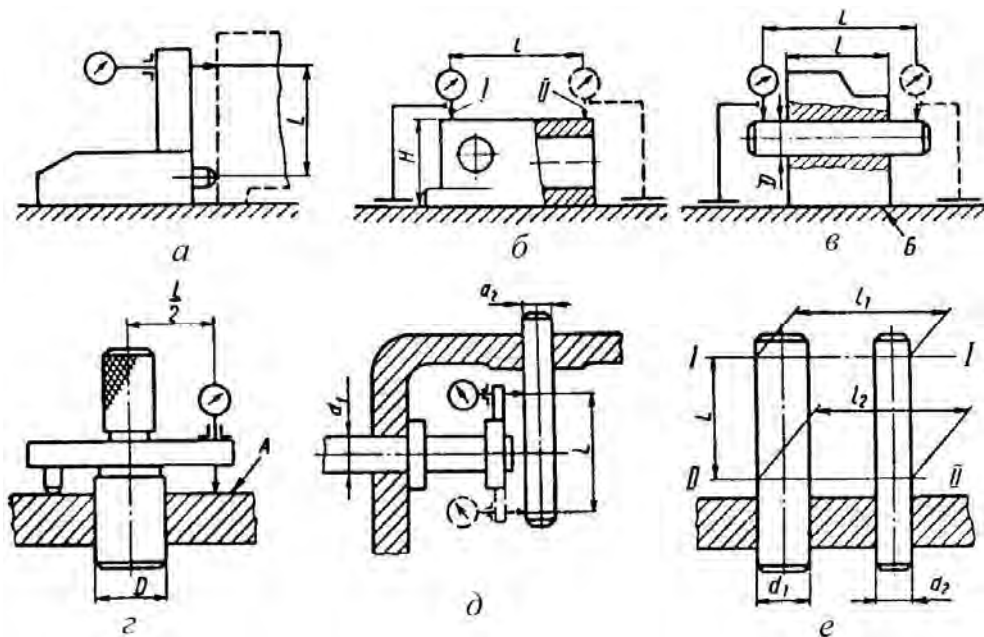


Рис. 29.1. Схемы контроля параллельности и перпендикулярности с использованием индикаторов

Контроль соосности отверстий крупногабаритных деталей можно вести по схеме, показанной на рис. 29.2, а, с использованием двух оправок и индикаторной насадки. Несоосность отверстий детали средних размеров удобнее контролировать по схеме, приведенной на рис. 29.2, б. Деталь 1 закрепляют в приспособлении на пальце 2 и вращают ее вокруг оси базового отверстия d_1 . При этом индикатором определяют биение отверстия диаметром d_2 относительно оси отверстия диаметром d_1 . Несоосность контролируемых отверстий равна половине измеренного биения. Это приспособление позволяет проконтролировать и неперпендикулярность торцов А и Б оси базового отверстия d_1 .

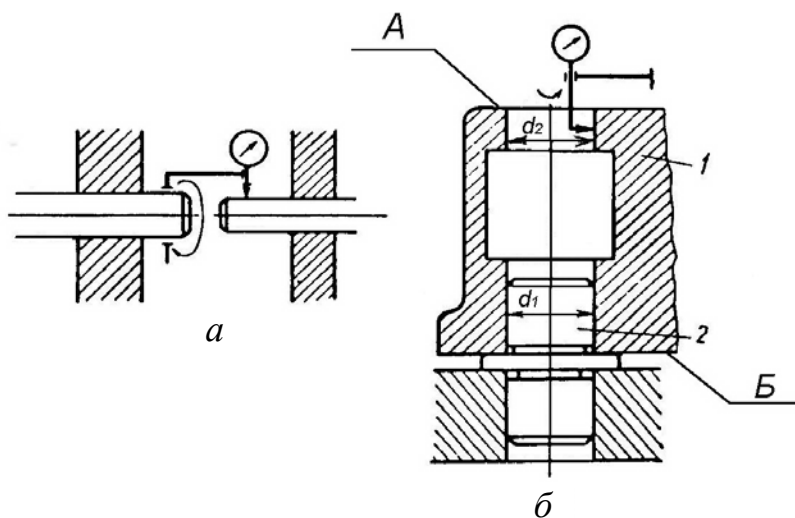


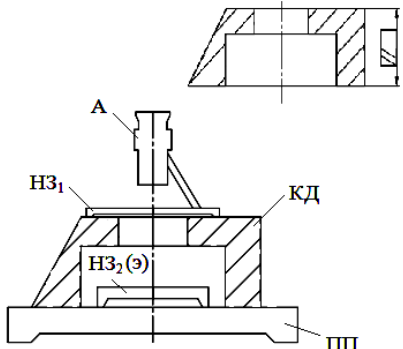
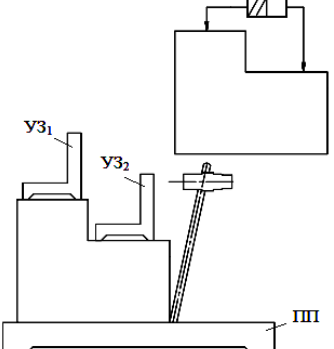
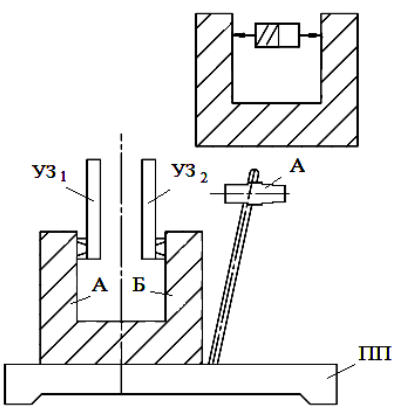
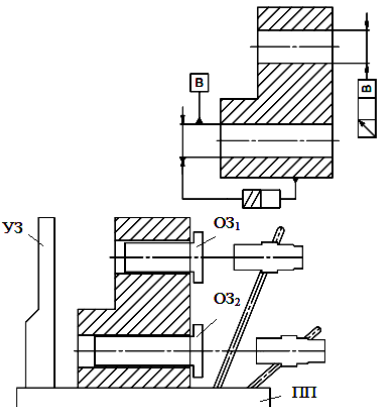
Рис. 29.2. Схема контроля соосности отверстий корпусных деталей

Контроль точности расположения поверхностей деталей с помощью автоколлиматоров осуществляется двумя методами: методом сравнения с эталоном и разностным методом.

Контроль параллельности плоскостей детали методом сравнения с эталоном показан на схеме А1 (табл. 29.1).

Таблица 29.1

Схема контроля точности расположения поверхностей корпусных деталей автоколлимационным методом

Обозначение схемы	Схема	Обозначение схемы	Схема
А. Контроль отклонения от параллельности			
А1		А2	
А3		А4	

На поверочную плиту ПП устанавливают эталон, представляющий собой накладное зеркало НЗ₂, установочная поверхность которого параллельна отражающей поверхности зеркала (на схеме последняя показана утолщенной линией). Автоколлиматор А, укрепленный на стойке, располагают перпендикулярно отражающей поверхности зеркала НЗ₂ путем его наклона и разворота. При этом установку автоколлиматора контролируют по совмещению автоколлимационного изображения сетки с центром самой сетки. За-

тем на место эталона на поверочную плиту базовой плоскостью устанавливают деталь КД. На контролируемую поверхность помещают накладное зеркало НЗ₁, к которому предъявляются те же требования, что и к эталону.

Если контролируемые плоскости детали непараллельны между собой на угол φ , то это приведет к наклону НЗ₁ относительно отражающей поверхности эталона. В результате автоколлимационное изображение сетки автоколлиматора от НЗ₁ сместится от центра этой сетки на величину, пропорциональную углу φ , который определяется непосредственно по сетке автоколлиматора.

Контроль параллельности плоскостей А и Б разностным методом представлен на схеме А2 (см. табл. 29.1). Деталь произвольно устанавливают на любую устойчивую опору (массивный стол, поверочную плиту, стол станка и т. п.). На одной из контролируемых плоскостей укрепляют накладное зеркало НЗ₁. Автоколлиматор А выставляют так, чтобы автоколлимационное изображение сетки от отражающей поверхности НЗ₁ находилось в поле зрения автоколлиматора. В этом положении по отсчетной сетке последнего снимают первый отсчет φ_1 . Затем на другой контролируемой поверхности укрепляют НЗ₂ и по автоколлиматору снимают второй отсчет φ_2 . Величина непараллельности φ (в угловой мере) равна разности отсчетов $\varphi_2 - \varphi_1$.

Схема А3 отличается от схемы А2 лишь тем, что накладные зеркала заменены зеркальными угольниками УЗ₁ и УЗ₂, у которых установочная поверхность перпендикулярна отражающей поверхности зеркала.

Для контроля параллельности оси нижнего отверстия базовой плоскости детали (схема А4) последнюю устанавливают на поверочную плиту, на которую помещают эталонный зеркальный угольник УЗ, и перпендикулярно ему выставляют автоколлиматор. Затем в нижнее отверстие детали вставляют зеркальную оправку ОЗ₁ и по углу наклона зеркала этой оправки, измеренной по автоколлиматору, определяют величину непараллельности. Для оценки параллельности осей отверстий детали необходимо, сняв отсчет по шкале автоколлиматора от ОЗ₁, переместить автоколлиматор в верхнее положение, выставить его перпендикулярно эталону УЗ, установить в отверстие оправку ОЗ₂ и снять 2-й отсчет. Разность отсчетов (в угловой мере) равна углу между осями контролируемых отверстий.

Автоколлимационные методы контроля имеют следующие достоинства:

- 1) высокая точность контроля;
- 2) контроль осуществляется бесконтактным способом;
- 3) при контроле деталей разностным методом не требуется точных поверочных плит, можно использовать любую устойчивую опору;
- 4) контрольные приспособления просты по конструкции и универсальны, поскольку автоколлиматоры, накладные зеркала, мостики, плиты могут быть использованы для контроля различных деталей;

5) автоколлимационные методы позволяют контролировать детали в любом удобном для контроля положении.

К недостаткам методов можно отнести:

- 1) необходимость использования сравнительно дорогих автоколлиматоров;
- 2) необходимость изготовления специальных вспомогательных зеркальных приспособлений (эталонов, оправок и т. п.).

29.3. Изготовление оправ, колец и тубусов

29.3.1. Конструктивно-технологическая характеристика оправ, колец и тубусов

Оправы представляют собой тонкостенные (0,5–5 мм) втулки и предназначены для крепления оптических деталей.

Внутренние поверхности оправ являются базами для установки в них круглых оптических деталей. Для закрепления оптических деталей на внутренней поверхности оправ выполняют специальные проточки (при закреплении разрезным пружинным кольцом), нарезают резьбу (при закреплении резьбовым кольцом) или формируют кольцевую кромку (при креплении оптических деталей завальцовкой).

Для уменьшения отражения света от внутренних стенок оправ на них делают рифления в виде кольцевых или винтовых канавок с шагом 0,35–0,5 мм и углом профиля 60°.

Наружные поверхности оправ имеют цилиндрическую посадочную поверхность или резьбу, необходимые для соединения оправ с тубусами.

С целью обеспечения центрировки оптических деталей внутренние и наружные поверхности оправ делают соосными, однако в отдельных случаях эти поверхности обрабатывают с некоторым эксцентриситетом. Такие эксцентриковые оправы часто используют в биноклярных оптических приборах для юстировки взаимного положения визирных осей.

Тубусы являются несущими силовыми деталями и имеют жесткую конструкцию. В тубусах закрепляют элементы оптической системы, механизмы их перемещения, диафрагмы. Рабочая поверхность тубусов обычно внутренняя. На ней обрабатывают одну или несколько соосных посадочных цилиндрических и резьбовых поверхностей, необходимых для установки и закрепления оправ. Кроме того, в конструкции тубуса предусматривают установочные и крепежные наружные поверхности для закрепления его в корпусе прибора.

На сопрягаемых оправках и тубусах иногда нарезают многозаходную окулярную резьбу, обеспечивающую значительные осевые перемещения оправ при небольшом угле их поворота, а также выполняют пазы, лыски, проточки и т. д.

На наружных поверхностях оправ и тубусов часто делают накатку для поворота их рукой. В приборах с автоматическим управлением на оправках и тубусах изготавливают зубчатые секторы.

Конструкции оправ и тубусов приведены на рис. 29.3, а–в.

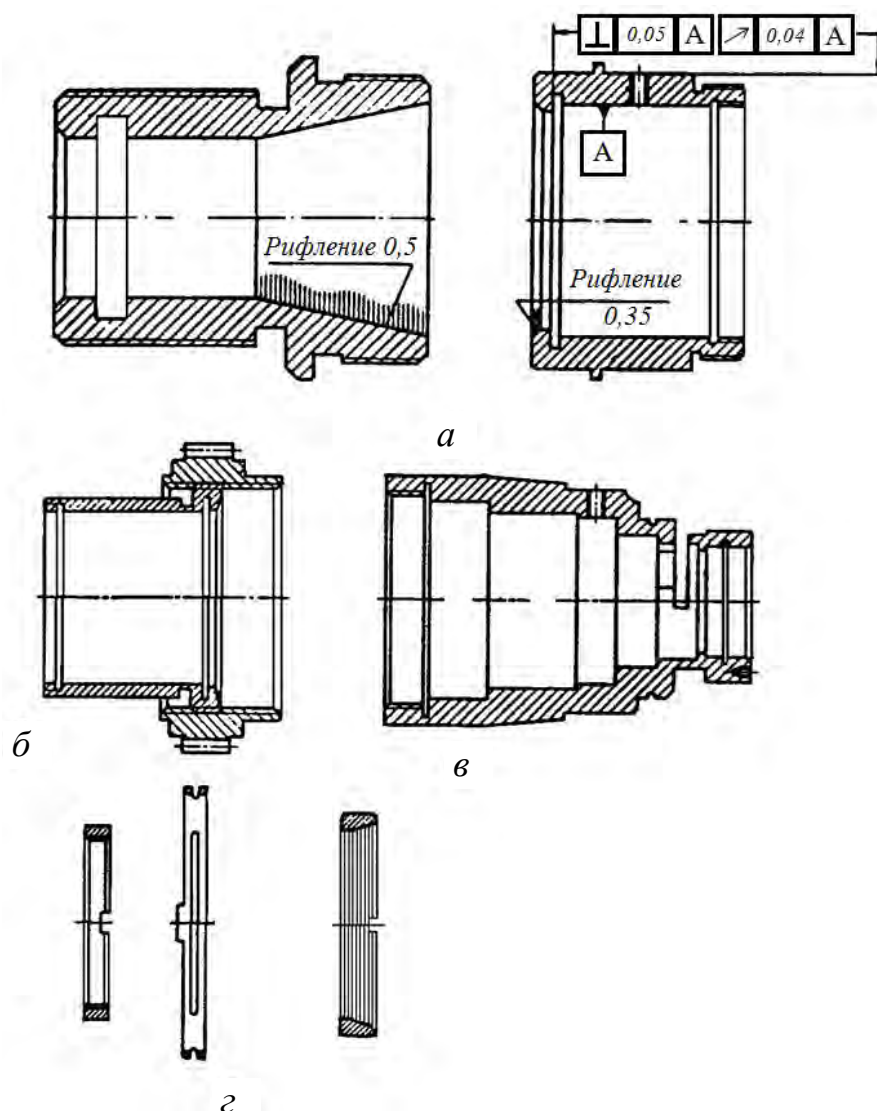


Рис. 29.3. Детали крепления круглой оптики

Кольца представляют собой короткие втулки с гладкими или резьбовыми цилиндрическими и коническими поверхностями (рис. 29.3, г). У резьбовых колец на торцах имеются шлицы или отверстия под ключ. Пружинные кольца имеют пазы на боковых поверхностях.

При изготовлении оправ, колец и тубусов применяют алюминиевые сплавы марок Д16, Д16Т, латуни и реже – бронзу. Стальные оправы встречаются редко, их изготавливают из сталей марок 20, 45, 50 или легированных сталей. В отдельных случаях для изготовления оправ применяют титановые сплавы.

При изготовлении оправ, тубусов и колец в качестве заготовок используют прутки и трубы, также их получают литьем под давлением и холодной штамповкой.

29.3.2. Типовой технологический процесс изготовления оправ, колец и тубусов

Технологический процесс изготовления оправ и тубусов состоит из следующих основных этапов.

1. Предварительная токарная обработка заготовок, при которой с посадочных поверхностей удаляют большую часть припуска. Размеры этих поверхностей на данной операции обрабатывают по 11–12-му квалитетам точности, осуществляют нарезание крепежных резьб, делают накатку.

2. Окончательная обработка посадочных поверхностей, в процессе которой обеспечивается требуемая точность размеров.

3. Обработка вспомогательных поверхностей (отверстий, пазов, шлицев и т. д.).

4. Нанесение на поверхностях оправ и тубусов шкал, товарных знаков, номеров и т. п.

5. Отделка деталей, нанесение покрытий.

На различных стадиях изготовления оправ и тубусов в технологический процесс часто вводят операции термической обработки и контрольные операции.

Термическую обработку вводят в технологический процесс с целью снятия внутренних напряжений в материале заготовки, которые оказывают существенное влияние на стабильность размеров детали, а также для улучшения механических свойств (твердости, износостойкости, прочности) ее материала.

Предварительную токарную обработку оправ и тубусов из прутков, труб и штучных заготовок осуществляют на токарно-револьверных станках и револьверных автоматах с использованием универсальных приспособлений и нормализованного режущего инструмента.

Окончательную обработку посадочных поверхностей оправ и тубусов ведут на высокоточных токарных и шлифовальных станках. Здесь точность размеров деталей достигается посредством их обработки на настроенном станке (если станок может обеспечить требуемую точность). В противном случае обработку ведут методом пробных проходов и промеров.

Точность расположения поверхностей достигается в основном путем их обработки за один установ, а также использования точных центрирующих приспособлений и соблюдения принципа совмещения баз.

Контроль линейных и диаметральных размеров оправ и тубусов в процессе их механической обработки осуществляют на рабочем месте с помощью калибров, шаблонов или универсальных измерительных инструментов. Такой контроль является составной частью операции механической обработки. В самостоятельную контрольную операцию выделяют контроль форм и расположения поверхностей, требующий специальных контрольных приспособлений.

Технологический процесс изготовления колец включает в себя токарные, фрезерные и сверлильные операции. На токарных операциях осуществ-

ляют обработку цилиндрических поверхностей, крепежных резьб и рифлений. Обработку выступов на торцах оправ, колец и тубусов и прорезей на боковых поверхностях пружинных колец производят на фрезерных станках.

29.3.3. Проектирование операций обработки оправ на токарно-револьверных станках

Проектирование операций обработки оправ на токарно-револьверных станках заключается в назначении последовательности обработки поверхностей тел вращения, выборе режущего и вспомогательного инструмента и определении режимов резания. Принятую последовательность обработки детали и выбранный инструмент изображают графически в виде схемы.

Для токарно-револьверных станков схема обработки представляет собой эскиз револьверной головки (рис. 29.4), оснащенной режущим и вспомогательным инструментом, а также с эскизами заготовки на каждом переходе. На эскизах режущий инструмент показывают в конечном положении, обрабатываемые поверхности выделяют жирными линиями, иногда проставляют получаемые размеры.

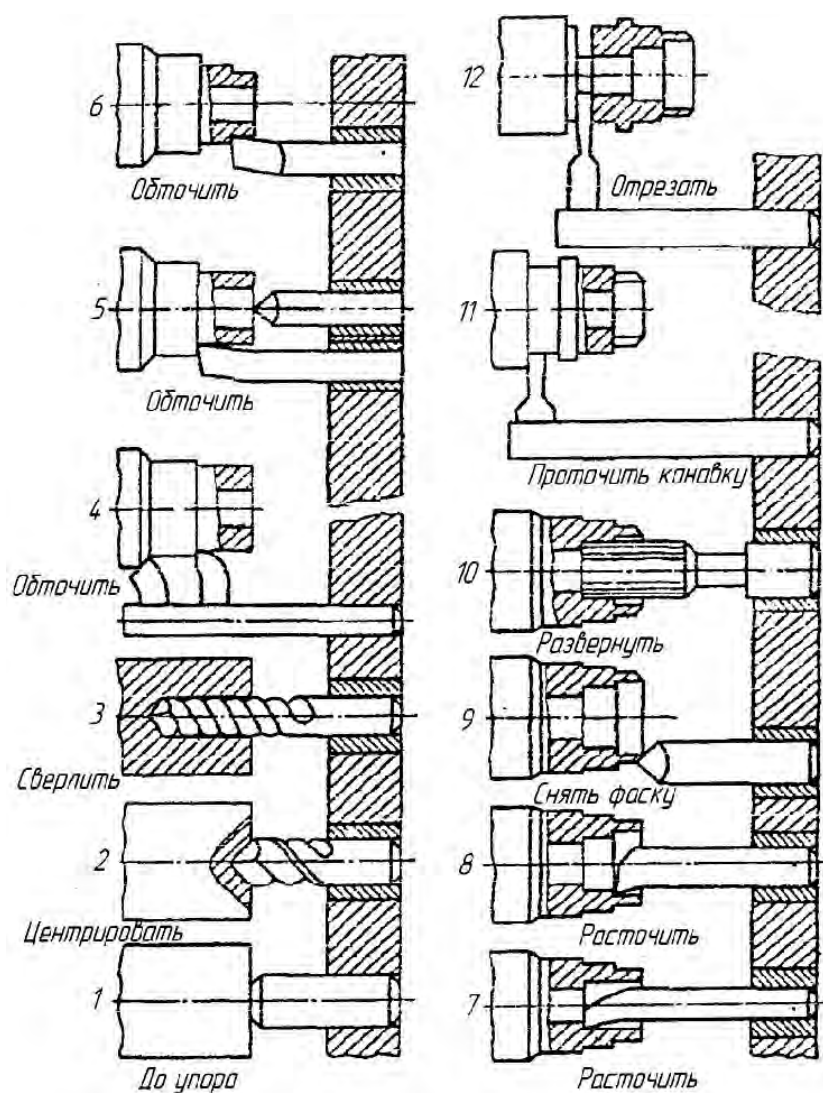


Рис. 29.4. План обработки оправы на токарно-револьверном станке

При составлении схемы обработки учитывают следующие рекомендации.

1. Холоднотянутые и шлифованные прутки следует закреплять в цанговых, а штучные заготовки и горячекатаные прутки – в кулачковых патронах.

2. Отверстия диаметром более 10 мм, имеющие небольшую глубину (отношение глубины к диаметру для сталей не более 3 и цветных сплавов не более 5), можно сверлить без предварительной центровки.

3. При обработке ступенчатых отверстий диаметром до 35 мм сначала сверлят отверстие большего диаметра, что сокращает время выполнения операции. Если обрабатывается отверстие диаметром более 35 мм, то рекомендуется предварительно просверлить отверстие малого диаметра, чтобы исключить участие перемычки сверла (поперечного режущего лезвия) в процессе резания.

4. Подрезку торца лучше выполнять после сверления отверстия, при этом сокращается основное время и не требуется точной установки резца по оси шпинделя.

5. При обработке отверстий в тонкостенных деталях сверлом или разверткой происходит увеличение диаметра наружной поверхности, поэтому чистовую обточку в этих случаях выполняют после обработки отверстия.

6. Следует стремиться к максимальному совмещению переходов, т. е. одновременно вести обработку несколькими инструментами, при этом уменьшается основное время обработки. Одновременно работающие резцы располагают так, чтобы возникающие при их работе усилия резания взаимно уравновешивались.

7. Режимы резания назначают с учетом материалов заготовки и режущего инструмента, заданного качества обработки, конструкции детали, применяемых смазочно-охлаждающих жидкостей и т. п. При обработке ступенчатой детали одновременно несколькими инструментами число оборотов n шпинделя в минуту вычисляют по допустимой в данном случае нормативной скорости резания v для наибольшего обрабатываемого диаметра заготовки d_{\max} :

$$n = \frac{1000v}{\pi d_{\max}}, \text{ об/мин.}$$

29.3.4. Окончательная токарная обработка оправ и тубусов

Необходимость выделения окончательной токарной обработки оправ и тубусов в отдельную операцию обусловлена следующим:

1) в процессе предварительной обработки не всегда удается обеспечить требуемую точность размеров;

2) после предварительной обработки под действием остаточных напряжений детали деформируются с образованием погрешности формы и расположения поверхностей.

Для уменьшения остаточных напряжений детали перед окончательной обработкой подвергают термическому воздействию.

Обработку двух и более внутренних соосных поверхностей и перпендикулярного к ним торца необходимо вести с одной установки. В этом случае деталь закрепляют по наиболее точной и протяженной наружной поверхности. Если посадочные поверхности должны быть расположены соосно с резьбовыми поверхностями, то следует обрабатывать резьбу одновременно с посадочными поверхностями. Если резьба получена при предварительной обработке, ее можно использовать в качестве базы. При этом для закрепления детали на станке применяется дополнительная резьбовая оправка (обработка от резьбы).

В случае необходимости обеспечить соосность внутренних и наружных посадочных поверхностей оправ обработку целесообразно вести «от отверстия», т. е. сначала обработать внутреннюю поверхность, а затем, базируясь на обработанное отверстие, следует точить наружную поверхность.

При обработке оправ и тубусов, к посадочным поверхностям которых предъявляются повышенные требования, сила их закрепления на станке должна быть минимальной, но обеспечивающей надежное фиксирование детали. Для уменьшения колебания величины погрешности формы в пределах партии оправ при их закреплении следует обеспечивать постоянное усилие зажима (например, тарированным ключом).

Погрешность формы оправ зависит не только от количества зажимных кулачков, но также от их формы и размеров. Радиус поверхности кулачков, контактирующей с деталью, должен быть равен радиусу поверхности детали, по которой она закрепляется. Этим обеспечивается более равномерное распределение усилия по поверхности детали, что уменьшает ее деформацию.

Для минимизации погрешности формы при закреплении труб их свободную сторону поджимают вращающимся центром.

29.3.5. Обработка вспомогательных поверхностей

Вспомогательные поверхности (отверстия, пазы, лыски и т. п.) служат для крепления оправ и тубусов к корпусу прибора, установки стопорных винтов, штифтов, для монтажа диафрагм и т. п. Вспомогательные отверстия бывают осевые и радиальные, глухие и сквозные, гладкие и резьбовые.

Обработку классных резьбовых отверстий ведут в следующей последовательности: сверление, зенкерование, развертывание, нарезание резьбы.

Для сверления отверстий в оправках или тубусах иногда используют кондукторы, позволяющие получать отверстия на одинаковом расстоянии от базовой поверхности всей партии деталей.

Отверстия зенкуют для образования конической поверхности под винт с потайной (конической) головкой и для снятия фасок перед нарезанием резьбы. Обработку ведут специальными зенковками, а иногда – зато-

ченными под соответствующие углы сверлами диаметром большим, чем диаметр отверстия.

Зенковкой специальной конструкции можно получить также неглубокое цилиндрическое отверстие несколько большего диаметра основного отверстия и соосно ему расположенного (например, под цилиндрическую головку болта или винта).

Сквозной паз (шлиц) на торцах фрезеруют дисковой фрезой (паз 1, рис. 29.5) на горизонтально- и вертикально-фрезерных станках, а несквозной паз 2 – на вертикально-фрезерном станке концевой фрезой.

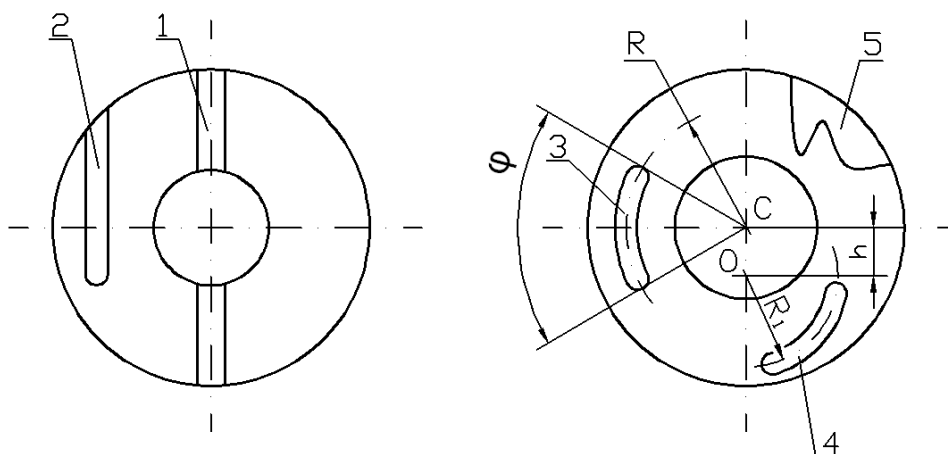


Рис. 29.5. Примеры вспомогательных поверхностей

Обработку криволинейных пазов обычно ведут на вертикально-фрезерных станках концевыми фрезами. В частности, радиусный концентричный паз 3 получают при круговой подаче детали в поворотном приспособлении, установленном на столе станка. При этом ось оправы совмещают с осью вращения приспособления, а фрезу располагают на расстоянии R_1 от оси приспособления. Угол φ выдерживают по предварительно установленным упорам или по угломерной шкале приспособления. Аналогичным способом ведут обработку паза 4, но в поворотном приспособлении оправу устанавливают так, чтобы ее ось симметрии O была смещена от оси вращения C поворотного приспособления (или поворотного стола) на величину h . Криволинейные пазы произвольной формы (паз 5) обрабатывают по копиру.

Пазы на боковой поверхности оправ и тубусов обрабатывают на вертикально-фрезерных станках, оснащенных делительными головками.

Зубчатые секторы на оправках обрабатывают зубофрезерованием или зубодолблением.

29.4. Обработка окулярной резьбы

Окулярная резьба имеет укороченный профиль с углом 60° и применяется в оправках объективов и окуляров для обеспечения значительных осевых перемещений оправ при небольших углах их поворота.

Рекомендуемое число заходов окулярной резьбы 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20, однако на практике часто применяют резьбы с нечетным числом заходов 3, 5, 7, 11. Для многозаходной резьбы действительно соотношение

$$P_n = p nk,$$

где P_n – ход резьбы;
 p – шаг резьбы;
 n – число заходов;
 k – количество оборотов.

Установлены условные обозначения окулярной резьбы на чертежах. Например, правая одиннадцатизаходная окулярная резьба диаметром 55 мм и шагом 1,5 мм обозначается: Ок 55 × 16,5 ($p1,5$); левая восьмизаходная резьба диаметром 40 и шагом 1,5 мм – Ок 40 × 12 ($p1,5$) LH, а правая однозаходная резьба диаметром 12 мм и шагом 1,5 мм – Ок 12 × 1,5 ($p1,5$).

К окулярной резьбе часто предъявляются жесткие требования соосности (порядка 0,01–0,05 мм) с цилиндрическими поверхностями детали.

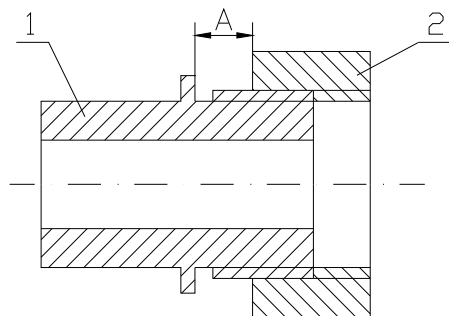


Рис. 29.6. Окулярная резьба

После окончательной обработки резьбы и сборки пары оправ «винт-гайка» резьбовое соединение должно удовлетворять заданным допускам по осевой и радиальной качке. Например, после притирки окулярной резьбы (рис. 29.6) оправы 1 (винт) с оправой 2 (гайка) для трех значений величины A должны удовлетворяться требования, представленные в табл. 29.2.

Таблица 29.2

Требования к точности окулярной резьбы

Расстояние, A , мм	Допустимая качка, мм	
	Осевая	Радиальная
1	0,02	0,04
5	0,025	0,05
10	0,03	0,06

Порядок обработки оправ с окулярной резьбой следующий. Сначала обрабатывают партию оправ, имеющих внутреннюю резьбу (гайки). Контроль нарезанной резьбы осуществляют резьбовыми калибрами – пробками. Затем нарезают резьбу на «винтах». При этом «винты» обрабатывают по «гайкам», которые используют как «калибры». Операцию нарезания резьбы на «винтах» продолжают до тех пор, пока «гайка» не будет навинчиваться на «винт» с определенным усилием, для чего на «винте» оставляют припуск порядка 0,01–0,015 мм. В результате получают скомплектованные пары оправ «винт-гайка».

Для требуемой плавности хода в окулярной резьбе на нее не наносят защитных покрытий. Поэтому окулярные резьбы нарезают после нанесения покрытий. Окулярную резьбу нарезают с помощью резцов на токарно-винторезных, револьверных станках и специализированных полуавтоматах.

После отмеченной обработки нарезания резьбы пары оправ с окулярной резьбой резцом на станке их притирают для достижения требуемых эксплуатационных характеристик соединения (плавного хода, отсутствия превышающей допуск радиальной и осевой качки), которые не могут быть получены при механической обработке резьб.

Процесс притирки окулярных резьб заключается в следующем. На резьбовую поверхность скомплектованной пары оправ «винт-гайка» наносят пасту ГОИ, детали свинчивают и сообщают им относительный проворот попеременно в одну и другую сторону, т. е. осуществляют их периодическое свинчивание и развинчивание. Данную операцию выполняют либо вручную, либо на станках, но с использованием ручного труда. Это связано с тем, что необходимое время обработки различных участков резьбы неодинаково и зависит от многих факторов (неравномерности припуска, оставленного на притирку, погрешностей формы деталей и т. п.). При ручной притирке время окончания обработки отдельных участков резьбы рабочий определяет по величине крутящего момента, который он прикладывает для относительного проворота оправ («по чувству»).

29.5. Особенности обработки корпусов труб

Корпуса-трубы имеют сравнительно тонкие стенки (2–5 мм) и значительную длину. Обычно с обеих сторон корпусов-труб обрабатывают точные соосные наружные и внутренние посадочные и вспомогательные поверхности.

Рассмотрим последовательность выполнения операций при изготовлении корпуса зрительной трубы (рис. 29.7).

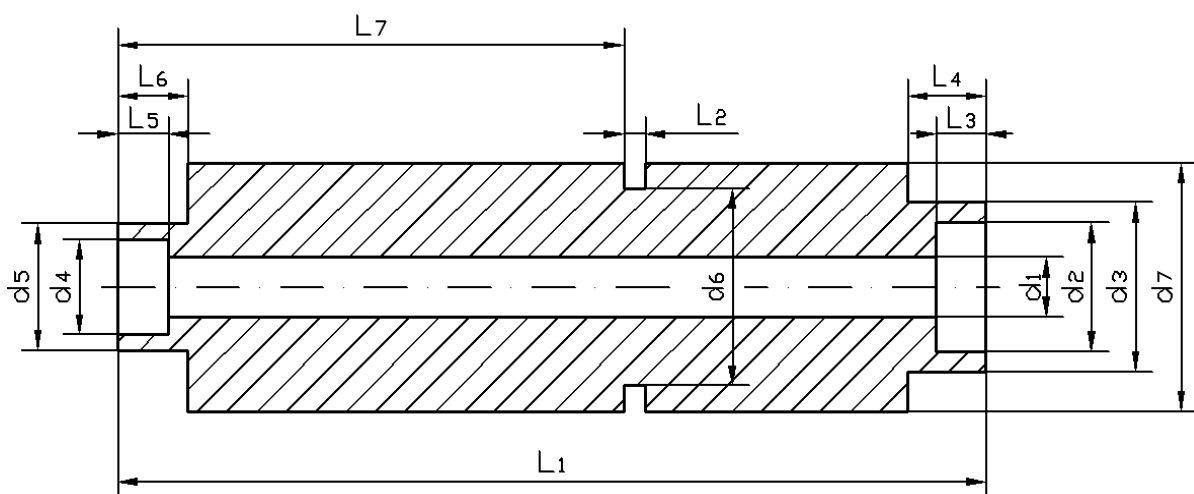


Рис. 29.7. Корпус зрительной трубы

У заготовки, полученной литьем под давлением, удаляют следы литника и приливов от плоскости разъема формы.

Для последующей токарной обработки деталь по внутренней необработанной поверхности (черновой базе) диаметром d_1 одной стороной устанавливают на разжимной оправке, которую закрепляют в патроне токарного станка, а вторую сторону детали поджимают вращающимся центром. На этой операции подрезают торцы в размер L_1 , обтачивают поверхности диаметрами d_7 и d_3 , а также протачивают канавку диаметром d_6 , выдерживая размеры L_7 и L_2 . Затем производят расточку отверстия диаметром d_2 . Для этого деталь по обработанной поверхности диаметром d_7 закрепляют в кулачковом патроне станка, а поверхностью диаметром d_3 вставляют в точно обработанное (внутренняя и наружная поверхности сосны) и выставленное в люнете кольцо. Это кольцо является дополнительной опорой, которая повышает жесткость детали, что позволяет обеспечить соосность поверхностей диаметрами d_2 и d_3 .

Аналогичным образом закрепляют деталь при обработке поверхностей диаметрами d_4 и d_5 .

29.6. Контроль оправ и тубусов

Точность обработки посадочных внутренних и наружных поверхностей оправ и тубусов контролируют с помощью предельных калибров (проходных и непроходных скоб и пробок), микрометрических инструментов (микрометров, микрометрических нутромеров и т. д.), штангенциркулей, штангенрейсмусов, индикаторов часового типа. При этом часто используют специальные и переналаживаемые контрольные приспособления. На рис. 29.8, а показано переналаживаемое приспособление, настроенное на контроль размера $15,5^{+0,019}$ детали 4, изображенной на рис. 29.8, б. В корпусе 1 установлена сменная вставка 2. Индикатор 3, укрепленный в корпусе, по набору концевых мер или по эталонной детали настраивается на контролируемый размер. Для контроля детали приспособление помещают в ее отверстие. Опорные поверхности А и Б соответственно корпуса 1 и вставки 2 упираются в торцы А' и Б' детали 4 (оправы). При этом показания индикатора для годной детали должны находиться в пределах допуска.

Резьбу на оправках контролируют резьбовыми калибрами. Рабочие резьбовые калибры применяют для контроля резьб в процессе их изготовления. Приемные резьбовые калибры предназначены для проверки резьбы в ОТК. Контроль внутренней резьбы осуществляют следующими калибрами: проходная и непроходная резьбовые пробки и предельные гладкие пробки для проверки внутреннего диаметра резьбы.

Для проверки наружной резьбы используют проходное и непроходное резьбовые кольца и предельные гладкие скобы для наружного диаметра резьбы.

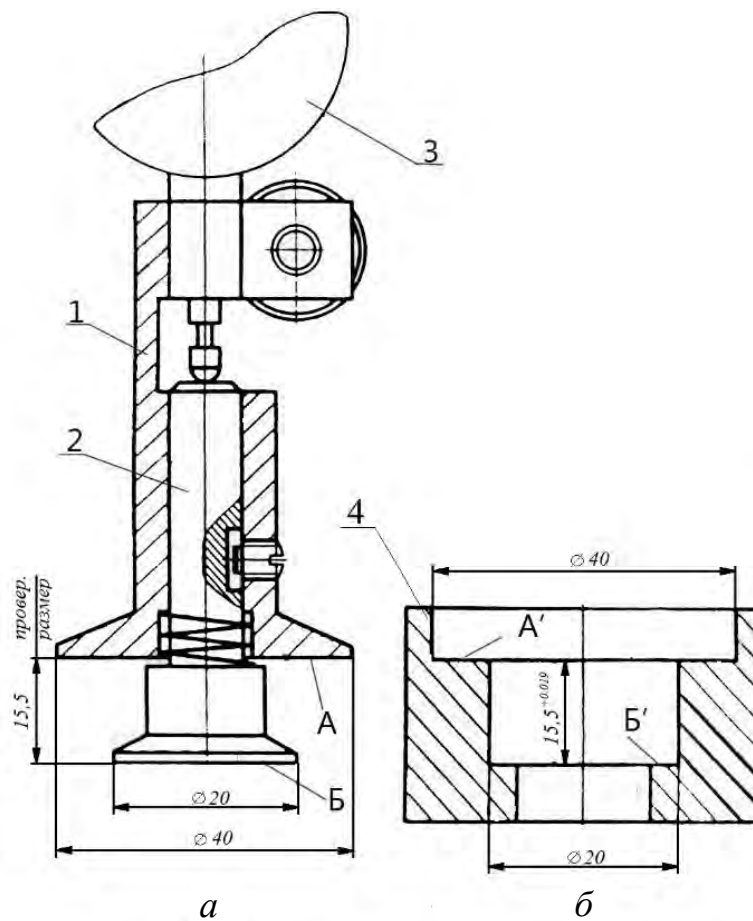


Рис. 29.8. Переналаживаемое приспособление для контроля линейных размеров оправы

На рис. 29.9 показано приспособление для проверки качки в окулярной резьбе. Гайку 4 скомплектованной пары оправ «винт-гайка» закрепляют в сменной втулке 3. Индикатор 1, закрепленный в стойке 2 и имеющий возможность перемещаться в вертикальном и горизонтальном направлениях, выставляют до соприкосновения с торцом «винта» (на рис. 29.10 не показан), покачивая который по индикатору определяют величину осевой и радиальной качки. Контроль осуществляют при различной длине свинчивания оправ.

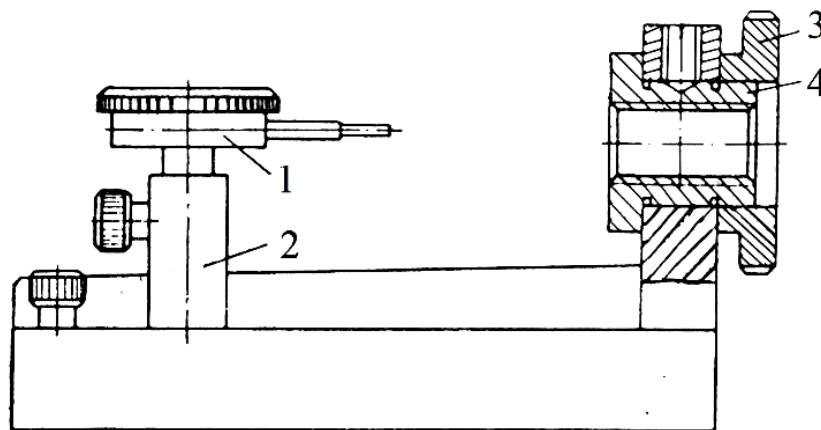


Рис. 29.9. Приспособление для контроля «качки» в окулярной резьбе

На рис. 29.10 приведена схема контроля параллельности торцов А и Б оправы, которая торцом А устанавливается на поверочную плиту, а в контакт с торцом Б приводится ножка индикатора, закрепленного в стойке. Разность показаний индикатора при вращении оправы должна быть в пределах допуска на непараллельность. Аналогичным образом можно проверить параллельность торцов В и Г торцу А.

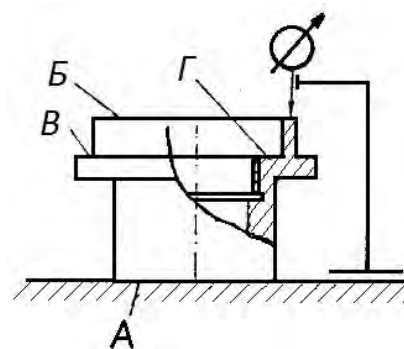


Рис. 29.10. Схема контроля параллельности торцов

Контроль биения наружных цилиндрических поверхностей и торцов относительно оси сквозного отверстия можно вести по схеме, показанной на рис. 29.11. Оправу 1 устанавливают на точной оправке 2, которую закрепляют в соосных центрах 3. При вращении оправки 2 с оправой 1 индикаторы показывают величины радиального и осевого биений поверхностей А и Б относительно оси отверстия В.

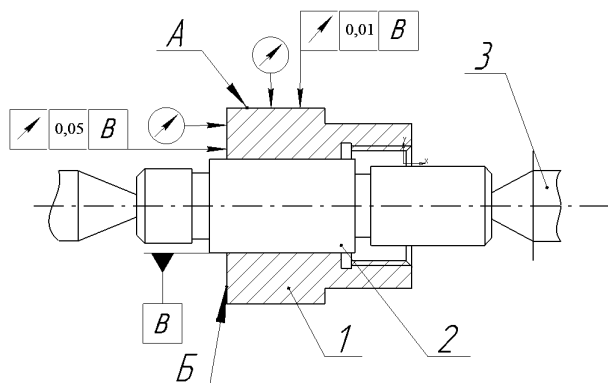


Рис. 29.11. Схема контроля биения поверхностей оправы

На рис. 29.12 показана схема контроля несоосности резьбы Ст М24 × 0,5 и отверстия диаметром 13,972_{-0,003} оправы 4.

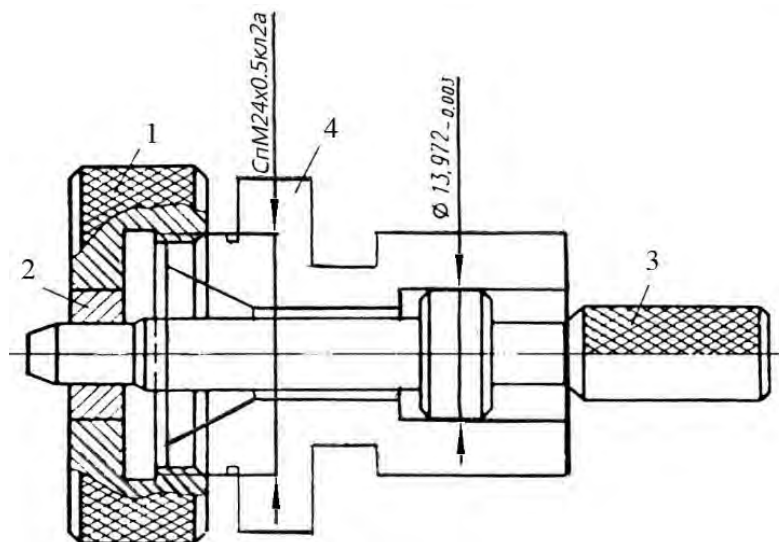


Рис. 29.12. Калибр для контроля биения поверхностей оправы

Гайку 1 с втулкой 2 навинчивают на резьбу оправы 4 и в отверстие диаметром 13,972 вводят пробку 3. Деталь считают годной, если пробка входит в отверстие втулки 2.

29.7. Изготовление зубчатых колес и реек

29.7.1. Методы нарезания зубьев зубчатых колес

Зубья мелко модульных колес невысокой степени точности (9–10) нарезают методом копирования дисковыми модульными фрезами (рис. 29.13, а), а более точные колёса – обкаткой червячными фрезами (рис. 29.13, б) и хвостовыми долбьяками (рис. 29.13, в). Обкатка является более производительной и точной по сравнению с другими методами.

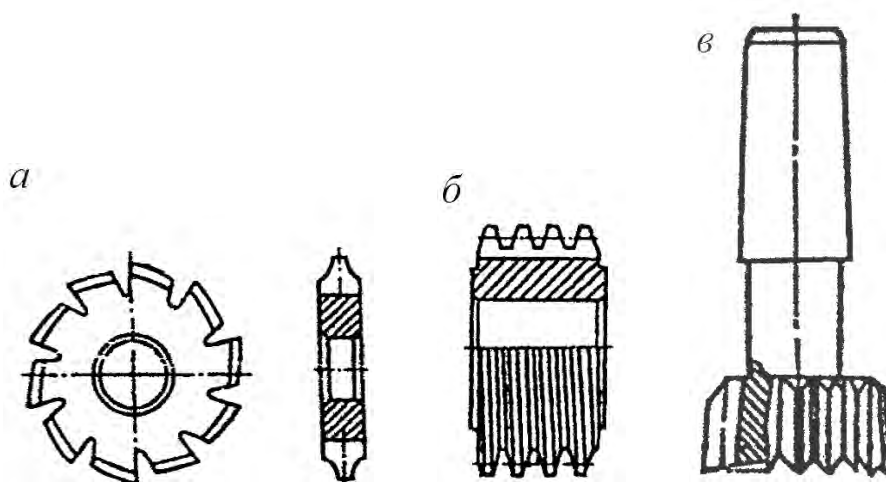


Рис. 29.13. Мелкоразмерные зубонарезные инструменты

При использовании дисковой фрезы ее выбирают по модулю зубьев колеса. Нарезание зубьев производится на универсально-фрезерных станках с использованием делительных приспособлений. Сначала дисковая фреза прорезает одну межзубную впадину, после чего заготовка поворачивается на один окружной шаг (на один зуб) и прорезается следующая межзубная впадина. Основные параметры процесса зубофрезерования – скорость вращения фрезы, глубина резания и подача.

При обработке зубчатых колес по методу обкатки червячная фреза совершает вращение и поступательное движение в направлении оси нарезаемого зубчатого колеса, вращающегося вокруг своей оси.

При нарезании зубьев колес хвостовым долбьяком последний совершает возвратно-поступательное движение, движение подачи и вращается вокруг своей оси. При этом заготовка также совершает вращательное движение.

Нарезание конических колес производится двумя зубострогальными резцами, совершающими встречное возвратно-поступательное движение.

29.7.2. Получение зубчатых колес литьем, холодной штамповкой и накатыванием

Ряд зубчатых колес из мягких (цинковых и алюминиевых) сплавов в условиях массового и крупносерийного производства изготавливают литьем под давлением. Этим методом можно получать небольшие по размеру зубчатые колеса невысокой степени точности. Литье под давлением часто заменяют методом холодной штамповки. Этот метод дает существенную экономию металла и более высокое качество колес.

Существуют два вида процессов изготовления зубчатых колес холодной штамповкой:

а) зубчатое колесо штампуют совместно с зубчатым венцом непосредственно из полосы (ленты);

б) заготовку (диск) получают механической обработкой, а штампуют только зубчатый венец.

Предпочтение следует отдать первому виду. Холодная штамповка может быть рекомендована для изготовления мелкозубчатых колес толщиной для цветных сплавов – до 1,5 мм, конструкционной стали – до 1 мм и легированной стали – до 0,9 мм.

Сущность холодного накатывания заключается в пластическом деформировании заготовки в процессе ее обкатывания зубьями инструмента.

Накатыванием изготавливают зубчатые колеса из деформируемых алюминиевых и медных сплавов, а также из малоуглеродистых и нержавеющей сталей. Накатывание производят на токарном станке с использованием специального приспособления.

Достоинства процесса зубонакатывания следующие: высокая производительность (в 5–10 раз выше, чем при обработке резанием), хорошее качество рабочих поверхностей зубьев и достаточно высокая точность геометрических параметров зубчатых колес, повышение износостойкости зубьев, экономия материала (диаметр заготовки под накатывание меньше, чем под обработку резанием).

29.7.3. Чистовая обработка цилиндрических зубчатых колес и термообработка

Назначение чистовой обработки зубчатых колес состоит в улучшении качества поверхности зубьев, повышении точности элементов зубчатого венца и обеспечении плавности работы передачи. Для чистовой обработки закаленных стальных зубчатых колес применяют зубошлифование, притирку и зубополирование, а для незакаленных колес – шевингование, зубообкатывание и приработку.

При *зубошлифовании* в качестве инструмента применяют абразивный шлифовальный круг, заправленный в виде червяка. Достоинствами зубошлифования абразивным червяком являются относительно вы-

сокая точность, высокий класс шероховатости поверхности зубьев (до 10-го) и высокая производительность, а недостатками – низкая стойкость абразивных червячных кругов и трудность их изготовления.

Притирка осуществляется как при параллельных осях притира и колеса, так и при их скрещивающихся осях. Притирка по второй схеме более совершенна. Рабочим инструментом являются зубчатые колеса – притиры. Число притиров может быть от одного до трех. Притиры изготавливают из серого чугуна.

Диаметр притира должен быть по возможности большим, число зубьев – не кратным числу зубьев притираемого колеса. Зубья у притиров выполняют утоненными на 0,05 мм. Ширина притира больше ширины венца обрабатываемого колеса.

Для притирки в качестве абразивного материала используют пасту на основе электрокорунда.

Зубополирование используют для отделки закаленных колес с числом зубьев менее 20 (трибов). Сущность процесса зубополирования состоит в относительном скольжении червячного диска, смазанного полировальной пастой ГОИ, и зуба зубчатого колеса. В результате зубополирования происходит сглаживание микронеровностей и повышается качество поверхности зуба.

Полировальные диски изготавливают из бука, капронита или сплава свинца (87 %), олова (4 %) и сурьмы (9 %).

Шевингование применяют для окончательной отделки зубьев цилиндрических колес. Применяют шевингование в основном для колес, к которым предъявляются высокие требования в отношении плавности зацепления и бесшумности, но которые не предназначены для точного углового отсчета.

Зубообкатывание сводится к зацеплению обрабатываемого колеса с закаленным эталонным колесом (обкатником). Обрабатываемое колесо прижимается к обкатнику с определенным усилием. При обкатке происходит смятие поверхностных неровностей (гребешков), оставшихся после зубофрезерования, что позволяет повысить класс шероховатости и поверхностную твердость зубьев.

Приработка сводится к взаимному обкатыванию работающих в паре колес на специальных установках. Приработку производят с использованием абразивного материала, но более часто – без абразива. Зубчатые колеса после приработки тщательно промывают в бензине. В результате приработки точность элементов колес не повышается, имеет место даже некоторое ухудшение профиля, но плавность зацепления и качество поверхности зубьев повышаются, а шум в передаче уменьшается.

В тех случаях, когда заготовки зубчатых колес получают посредством давления (горячей или холодной штамповкой), перед обработкой резанием проводят термообработку с целью снять внутренние напряжения и получить однородную структуру материала.

При использовании заготовок из листового материала для снятия внутренних напряжений и стабилизации размеров их также подвергают термообработке.

Полностью изготовленные зубчатые колеса при необходимости направляют на химико-термическую обработку (цианирование, цементация, азотирование или закалку с последующим отпуском).

29.7.4. Зубчатые колёса из пластмасс

Колёса из пластмасс имеют малый вес, работают бесшумно в условиях ограниченной смазки и без нее, а в агрессивных и абразивных средах обладают высокими антифрикционными свойствами, за счет упругой податливости компенсируют неточности изготовления и монтажа, просты в изготовлении. Недостатками зубчатых колес из пластмасс являются сравнительно небольшая нагрузочная способность и размерная нестабильность в температурно-влажностных средах.

При необходимости отвода тепла из зоны контакта зубчатых колес применяют металлополимерные зубчатые передачи: малое колесо – из стали, а большое – из пластмассы. Использовать для зубчатых пар сочетание «цветные металлы–пластмассы» не рекомендуется вследствие быстрого износа зубчатой передачи. Особенно интенсивен износ в зубчатых передачах, в которых одно из колес изготовлено из алюминиевого сплава, а другое – из пластмассы.

Пластмассовые колёса бывают неармированные и армированные. В последнем случае армирующие элементы выполняют в виде накладных шайб, ступиц-втулок, валов с выступами и т. д.

Для получения заготовок зубчатых колес из пластмассы применяют прямое прессование, литьевое прессование и литье под давлением. Прямое и литьевое прессование применяют при переработке терморезистивных материалов, а литье под давлением – при переработке термопластов.

Предварительную механическую обработку заготовок зубчатых колес из пластмасс проводят на токарном станке. В процессе этой обработки помимо удаления литников и облоя производят обточку наружной поверхности и подрезку торцов. Для снятия внутренних напряжений, повышения твердости и уменьшения гигроскопичности заготовки после предварительной токарной обработки подвергают термической обработке, режимы которой устанавливают экспериментально. Затем следует окончательная обработка заготовок на токарном станке, после чего нарезают зубья.

29.7.5. Изготовление зубчатых реек

Рейки бывают косозубые и прямозубые, преимущественно с прямолинейным профилем зуба.

Технологический процесс изготовления реек включает следующие этапы: получение заготовок, изготовление поверхностей и отверстий крепления, фрезерование зубьев.

Заготовками для реек в зависимости от масштаба производства и размеров рейки могут быть холоднотянутые (волооченные) и горячекатаные прутки требуемого поперечного сечения; полосы, отрезанные от листа и обработанные после отрезки, а также специальные (литые) заготовки.

Изготовление поверхностей и отверстий крепления включает фрезерование плоскостей, сверление отверстий и нарезание в них резьбы. Нарезание зубьев при отсутствии специального оборудования осуществляется на обычных горизонтально-фрезерных станках дисковыми фрезами. Нарезаемую заготовку располагают поперек стола станка. После прорезки одной впадины стол возвращают в исходное положение и поперечным перемещением стола смещают нарезаемую заготовку на один шаг. Так последовательно нарезают все зубья рейки. Если нарезают косозубую рейку, стол станка поворачивают на угол наклона зубьев. С целью повышения производительности труда при нарезании зубьев на столе станка закрепляют несколько заготовок реек или на шпинделе устанавливают несколько фрез на расстоянии, кратном шагу рейки, т. е. одновременно нарезают несколько зубьев.

В условиях серийного и массового производства нарезание коротких реек производят специальными кольцевыми фрезами, позволяющими нарезать все зубья одновременно, или используют специальные зубореечные полуавтоматы.

Литература к разделу 3

1. Маталин, А. А. Технология машиностроения : учеб. для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение; Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя : в 3 т. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 656 с.
3. Колесов, И. М. Основы технологии машиностроения : учеб. для машиностроительных специальностей вузов / И. М. Колесов. – 3-е изд. – М. : Высшая школа, 1999. – 591 с.
4. Технология машиностроения : учеб. для вузов : в 2 т. / под ред. А. М. Дальского. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – Т. 1. – 564 с.; Т. 2. – 640 с.
5. Режимы резания металлов : справочник / Ю. В. Барановский [и др.]. – М. : НИИТавтопром, 1995. – 456 с.
6. Общемашиностроительные нормативы режимов резания : справочник : в 2 т. – М. : Машиностроение, 1991. – Т. 1. – 640 с.; Т. 2. – 304 с.

7. Маталин, А. А. Технология машиностроения : учеб. / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, 1985. – 512 с.

8. Мосталыгин, Г. П. Технология машиностроения : учеб. / Г. П. Мосталыгин, Н. Н. Толмашевский. – М. : Машиностроение, 1990. – 227 с.

9. Филонов, И. П. Инновации в технологии машиностроения / И. П. Филонов, И. В. Баршай. – Минск : Вышэйшая школа, 2009. – 110 с.

10. Минченя, В. Т. Основы автоматизации : лабораторный практикум : в 2 ч. / В. Т. Минченя, А. Л. Савченко. – Минск : БНТУ, 2002. – Ч. 1. – 113 с.

Раздел 4

СБОРКА И ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Глава 30. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

30.1. Особенности оптических приборов

Действие оптических приборов основано на прохождении света через оптические детали и отражении от них, поэтому изменения взаимного расположения оптических элементов вызывают отклонение луча от расчетного направления. Такими изменениями в оптическом приборе могут быть поворот зеркала, наклон плоскопараллельной пластины, разворот измерительной сетки и призмы, нарушение воздушных промежутков между линзами и др. Этим явлениям можно избежать путем повышения точности изготовления деталей, однако такой путь не всегда возможен и экономически не оправдан. В процессе сборки оптических приборов целесообразнее выполнять различные регулировочные и пригоночные работы, которые называются *юстировкой*.

Для выполнения юстировки требуется изготовление специальных оптических контрольно-юстировочных и измерительных приборов, которые являются вспомогательными изделиями.

Оптический прибор делят на отдельные узлы с заданными оптическими параметрами (например, увеличением, разрешающей способностью, качеством изображения и т. д.), которые необходимо контролировать в процессе сборки прибора. Вследствие этого в оптических приборах отдельные механические узлы, несущие оптические детали, конструктивно должны быть оформлены так, чтобы их можно было собирать, регулировать и контролировать независимо друг от друга.

Особые требования предъявляются к чистоте оптических деталей, загрязнение которых уменьшает световой поток, проходящий через прибор. Кроме того, если загрязненные поверхности оптических деталей расположены в плоскости промежуточного изображения, то эти загрязнения будут

видны в поле зрения, что затрудняет наведение прибора на объект и может послужить источником ошибки при измерениях. Поэтому в технологическом процессе сборки прибора предусматривают операции чистки оптических деталей, которые выполняют в специальном помещении с повышенными требованиями к чистоте. В таком же помещении проводят сборку оптических узлов приборов.

30.2. Основные понятия и определения

Изделием называется любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии.

Различают следующие виды изделий:

детали;

сборочные единицы;

комплексы;

комплекты.

Д е т а л ь представляет собой изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций.

С б о р о ч н а я е д и н и ц а является изделием, составные части которого подлежат соединению между собой сборочными операциями (свинчиванием, сваркой, пайкой, склеиванием и др.) на предприятии-изготовителе.

К о м п л е к с состоит из двух или более законченных изделий, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций основного характера.

К о м п л е к т состоит из двух или более законченных изделий, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями и имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера (комплект запасных частей, комплект инструмента и принадлежностей и т. п.).

Б а з о в ы м у з л о м называется узел, с которого начинается сборка прибора.

Оптические детали и узлы имеют оптические и механические сборочные базы. Под *оптической сборочной базой* оптических деталей и узлов понимают такие их элементы, которые определяют направление лучей или положение изображения в приборе. Оптическими сборочными базами могут быть точки (узловая точка, вершина и фокус линзы), линии (ребра зеркал и призм, оптические оси линз) или плоскости (главная и фокальная плоскости линзы, плоскость главного сечения и грань призмы).

30.3. Структура технологического процесса сборки

Под *технологическим процессом сборки* понимается определенная последовательность приемов (операций) по соединению, регулировке и сов-

местной отладке деталей с целью получения прибора (узла), отвечающего своему назначению и всем предъявленным к нему техническим требованиям.

Сборка оптических приборов (кроме простейших) обычно состоит из трех основных этапов:

механическая сборка;

оптическая сборка;

юстировка оптических систем узлов и прибора в целом.

Механическая сборка включает в себя соединение механических деталей и узлов, монтаж электрической части прибора, регулировку и проверку взаимодействия механизмов и отсчетных устройств прибора.

Оптическая сборка сводится к соединению оптических и механических деталей.

Юстировка оптических систем узлов и прибора в целом включает выявление неточностей взаимного расположения деталей и узлов и их смещение с целью устранения ошибок, а также фиксацию достигнутого положения деталей и узлов.

В процессе сборки и юстировки оптических приборов также выполняют чистку оптики, герметизацию прибора и его испытания согласно техническим условиям (ТУ).

30.4. Исходные данные, необходимые для проектирования процесса сборки

Технологический процесс сборки прибора должен отвечать техническим и экономическим требованиям. Технические требования связаны с целевым назначением прибора, его надежностью и точностью. Экономические требования предусматривают минимальные затраты труда и издержек производства. Из возможных вариантов технологического процесса сборки, обеспечивающих выполнение технических требований, должен быть выбран вариант, наиболее экономичный для заданных условий производства.

Исходными данными для проектирования технологического процесса сборки являются:

программа выпуска приборов;

описание прибора, определяющее его целевое назначение;

рабочие чертежи прибора, его узлов и деталей;

монтажные схемы, показывающие расположение электрических элементов конструкции и монтажных проводов;

спецификации деталей и узлов с указанием их полного наименования, индекса и количества деталей, идущих на одну сборочную единицу;

технические условия на прибор, наиболее ответственные его узлы и детали.

Помимо перечисленных исходных данных при проектировании технологического процесса следует пользоваться руководящими и вспомогатель-

ными материалами. К руководящим материалам относятся отраслевые стандарты, нормативы на материалы, инструменты, приспособления и оборудование, режимы и нормативы для расчета технических норм, типовые и нормализованные технологические процессы, производственные инструкции.

К вспомогательным относятся различные материалы справочного характера, альбомы применяемого оснащения по аналогичным родственным приборам.

30.5. Общие требования технологии сборки к конструкции

В процессе проектирования оптических приборов конструктору необходимо параллельно решить две задачи:

1. Обеспечить технические характеристики изделия, т. е. удовлетворить всем требованиям ТУ, вытекающим из условий его эксплуатации.

2. Удовлетворить требованиям технологии производства оптического прибора.

Для организации высокопроизводительного технологического процесса сборки конструкция оптических приборов должна обеспечивать следующее:

непрерывность (поточность) процесса сборки, т. е. последовательность соединения деталей и узлов в готовое изделие без промежуточных разборок, усложняющих технологический процесс;

независимость сборки узлов, т. е. возможность разделения прибора на ряд узлов, сборка которых может выполняться параллельно и независимо друг от друга;

доступ к местам сборки и юстировки, а также удобство выполнения этих операций;

возможность применения юстировочных устройств (контрольно-юстировочный прибор), использование которых при исправлении одной ошибки не вносило бы погрешность в расположение других элементов, в результате чего юстировка усложняется, а иногда становится невозможной;

минимальное число пригоночных работ;

необходимую жесткость и стабильность положения деталей с целью сохранить технические характеристики прибора как на стадии проведения испытаний, так и в процессе его эксплуатации.

30.6. Технологическая документация процесса сборки

Для оформления процесса сборки разрабатывается технологическая документация следующих видов (для каждого узла в отдельности и прибора в целом):

комплектовочная карта;

карта укрупненного технологического процесса сборки (маршрутная карта);

операционная карта сборки;
схема сборки;
карта юстировки.

Комплектовочная карта содержит перечень и количество всех деталей, входящих в прибор.

Маршрутная карта отражает укрупненную последовательность технологического процесса сборки узлов и общей сборки прибора из собранных узлов.

Операционная карта сборки отражает подробную последовательность технологического процесса сборки узлов из деталей.

Схема сборки графически изображает процесс соединения деталей в узлы и узлов в готовое изделие. Схемы сборки могут быть укрупненные и развернутые.

В **укрупненной** схеме сборки графически изображается процесс соединения узлов в готовое изделие, а в **развернутой** – процесс соединения деталей в готовый узел.

Карта юстировки прибора отражает последовательность юстировки узлов и прибора в целом. При этом в карте юстировки должны быть отражены способы юстировки, методы и средства контроля.

30.7. Разработка схем сборки

Изучение прибора завершается составлением схемы его сборки. Такие схемы отображают сборочные элементы, из которых состоит изделие, взаимосвязь между ними, последовательность сборки. Схемы сборки разрабатываются на основании изучения чертежей узлов, общих видов, деталей прибора, его кинематической, электрической и оптической схем.

Различают исходную и технологическую (рабочую) схемы сборки.

Исходные схемы сборки строятся с максимальным расчленением прибора на сборочные единицы независимо от программы выпуска изделий и характера технологического процесса сборки.

На *технологических* схемах сборки наносят технологические указания по выполнению сборочных операций (например, узел сб. 5.1 припаять к узлу сб. 7.2, отрегулировать осевой зазор 0,05–0,1 мм и др.).

Технологическая схема становится основным оперативным документов, по которому персонал сборочного цеха знакомится с последовательностью сборки изделия, комплектует изделие, в надлежащей последовательности подает сборочные единицы, детали и материалы к местам сборки, ведет учет, расставляет рабочих, планирует производство.

Схемы сборки могут быть *развернутыми* (до деталей включительно) и *укрупненными*. В укрупненные схемы включаются только узлы.

Расчленение конкретного изделия на составные части (узлы, детали) зависит от его конструкции. Оно всегда условно и применимо только для данного прибора. Однако можно наметить общие положения, которыми

нужно руководствоваться при расчленении изделия на сборочные единицы и составлении схемы сборки.

1. Выделение того или другого соединения в сборочную единицу должно быть возможным и целесообразным как в конструктивном, так и в технологическом отношении. Возможность технологического существования сборочных единиц означает, что их можно отдельно собирать, хранить, транспортировать и т. д.

2. Исходные схемы сборки строятся по принципу образования наибольшего количества сборочных единиц и независимости этих схем от программы выпуска приборов.

3. Минимальное количество деталей, необходимое для образования сборочной единицы, равно двум.

Схемы сборки, разработанные в соответствии с перечисленными положениями, позволяют наглядно обозреть изделие в целом и проанализировать его качество в отношении сборки.

Технологические схемы сборки целесообразно составлять во всех случаях при любом типе производства, так как они способствуют дифференциации процессов сборки, значительно сокращающей длительность производственного цикла.

30.8. Проектирование операционной технологии

30.8.1. Сборочные операции и их последовательность

После изучения прибора по назначению, конструкции, принципу работы, требованиям, предъявляемым изделию и наиболее ответственным его узлам, составления исходной схемы сборки разрабатывается план (последовательность) выполнения сборочных операций и их содержание.

Количество операций, на которое расчленяется сборочный процесс данного объекта, бывает различным. Операции составляются по принципу концентрации или дифференциации.

В условиях единичного, опытного и мелкосерийного производства операции обычно являются *концентрированными* (укрупненными) и состоят из большого числа переходов. Изделие собирается на нескольких или даже на одном рабочем месте одним или несколькими рабочими.

К недостаткам концентрированной сборки относятся:

длительность времени сборки одного прибора (цикла сборки);

использование рабочего высокой квалификации для выполнения части несложных сборочных работ;

трудность механизации и тем более автоматизации нерасчлененных сборочных операций.

В серийном и массовом производствах операции строятся по принципу *дифференциации* (расчленения) сборочного процесса на большое число простых операций, каждая из которых выполняется на определенном рабочем месте.

При дифференцированной сборке работы выполняются одновременно большим количеством рабочих. Это резко уменьшает цикл сборки, позволяет лучше использовать рабочих в соответствии с квалификацией и способствует их специализации на выполнении определенной операции, что облегчает оснащение рабочего места совершенной оснасткой.

В каждом конкретном случае должна быть определена техническая и экономическая целесообразность степени дифференциации. Излишняя дифференциация приводит к возрастанию потерь вспомогательного времени на установку и снятие собираемого элемента, повышению утомляемости рабочего при выполнении мелких однообразных переходов.

Последовательность сборочных операций зависит от конструктивных особенностей прибора и методов обеспечения требуемой точности.

При разработке последовательности сборки необходимо руководствоваться следующим:

предшествующие операции не должны затруднять выполнение следующих;

при поточной схеме сборки разбивка процесса на операции диктуется ритмом сборки, причем время, затрачиваемое на выполнение каждой операции, должно быть равно или кратно ритму;

после наиболее ответственных операций, а также после операций, содержащих регулировку или пригонку, вводится обязательный контроль.

30.8.2. Операции, виды и организационные формы сборок

При сборке оптических приборов выполняются следующие основные операции:

контроль (измерение);

регулирование положения деталей и узлов;

закрепление деталей и узлов в требуемых положениях.

Кроме перечисленных основных операций в процессе сборки приборов приходится выполнять ряд дополнительных и вспомогательных операций, к числу которых относятся: слесарно-механические (сверление отверстий, нарезание резьбы и т. п.), слесарно-пригоночные (шабрение, доводка, зачистка), промывка, продувка, антикоррозионная и противоосыпная обработка, окраска, лакировка, смазка и др.

В зависимости от точности изделия, типа производства и ряда технико-экономических факторов сборочные процессы в приборостроении разделяют на следующие виды: сборка по принципам индивидуальной пригонки и взаимозаменяемости деталей, селективная сборка и сборка с применением компенсаторов.

И н д и в и д у а л ь н а я п р и г о н к а. Для получения требуемых физических параметров узла или прибора в целом посредством слесарно-пригоночных операций производится необходимое изменение размеров механических деталей, т. е. пригонка деталей по месту. Данный метод тру-

доемкий и непроизводительный. Он применяется в основном при изготовлении приборов опытной партии и в случае необходимости точной посадки зеркал и призм (в оправках) в отдельных серийных приборах.

Сборка по принципу взаимозаменяемости. Различают взаимозаменяемость полную, ограниченную и неполную.

Полная взаимозаменяемость основана на том, что предписанные требования к узлу, прибору обеспечиваются простым соединением деталей и узлов без пригонок, компенсацией и т. п., что может быть достигнуто при изготовлении деталей по строго рассчитанным допускам. Достоинство принципа – высокая производительность сборки и простота ремонта, недостатки – высокая трудоемкость изготавливаемых деталей.

Под сборкой с *ограниченной взаимозаменяемостью* понимают сборку, основанную на принципе полной взаимозаменяемости, но только в пределах одного предприятия или группы предприятий.

При *неполной* взаимозаменяемости расчет допусков ведется по вероятностному методу с предусмотренным процентом риска на то, что какое-то число деталей не будет сопрягаться с парными деталями. При таком расчете допуски на детали несколько расширяются.

Селективная сборка основана на подборе сопрягаемых деталей для обеспечения заданной точности функционирования прибора и позволяет расширить допуски на применяемые детали.

Сборка с компенсацией. Различают два вида сборки с компенсацией: сборка с конструктивной и с технологической компенсацией.

Сборка с *конструктивной* компенсацией основана на регулировке положения деталей и узлов прибора путем специальных элементов, введенных в конструкцию прибора (эксцентриковые оправы для центрировки объективов биноклярных приборов, винты для регулирования параллельности зеркал, упругие элементы для выбора зазоров и др.).

Под *технологической* компенсацией принято понимать проведение пригонки положения деталей и узлов непосредственно в процессе сборки (пришабривание, шлифовка и припиловка сборочных баз механических деталей).

Существуют две организационные формы сборки: стационарная и подвижная.

Стационарная сборка выполняется на одном месте, к которому подают все необходимые детали или предварительно собранные узлы. Эта сборка применяется в условиях единичного и серийного производства приборов.

При стационарной сборке приборов весь сборочный процесс часто выполняет один слесарь-сборщик или бригада слесарей-сборщиков. Общую отладку прибора, как завершающую стадию процесса, выполняет квалифицированный сборщик-юстировщик или отдельная бригада.

В условиях *подвижной* сборки происходит транспортировка собираемого изделия от одного сборочного места к другому; на каждом из таких

мест рабочий-сборщик выполняет одну повторяющуюся операцию. Необходимые детали и узлы подают к местам сборки вручную или посредством конвейера.

30.9. Экономическая оценка технологических процессов

При разработке технологии изделия необходимо рассматривать несколько вариантов процессов его сборки, обеспечивающих получение требуемых качественных характеристик прибора. Из возможных вариантов выбирается наиболее экономичный и производительный для заданных производственных условий.

Критериями оценки технологического процесса сборки являются следующие основные показатели:

трудоемкость операций и всего сборочного процесса (или производительность, являющаяся величиной, обратной трудоемкости);

себестоимость выполнения отдельных сборочных операций и всего технологического процесса сборки.

Помимо данных показателей, называемых *абсолютными*, применяются еще и так называемые *относительные* показатели экономичности технологического процесса, к числу которых относятся:

коэффициент загрузки каждого сборочного рабочего места;

средний коэффициент загрузки сборочной линии;

коэффициент трудоемкости процесса сборки, характеризующий трудоемкость сборки по отношению к трудоемкости изготовления изделия в целом, и некоторые другие.

Экономичность сборочной операции может характеризоваться *стоимостью* ее выполнения. При определении себестоимости следует учитывать и влияние оборудования, связанного с применением того или иного метода сборки. Не всегда выбор наиболее производительного оборудования экономически оправдан. Так, при малой программе выпуска изделий применение высокопроизводительного, но дорогого оборудования приводит к возрастанию себестоимости изготовления изделия.

30.10. Типизация технологических процессов

Усовершенствование конструкций приборов различного назначения приводит к их унификации, использованию в них нормализованных и стандартизированных сборочных элементов. Это способствует унификации, нормализации и типизации технологических процессов сборки приборов.

Задача *типизации* технологических процессов – установление единых и оптимальных методов выполнения операций сборки однородных узлов приборов различных конструкций с учетом типа производства.

Типизация технологических процессов позволяет устранять различия в технологии изготовления однотипных изделий, внедрять прогрессивные

технологические процессы, снижать трудоемкость и сокращать сроки проектирования рабочих технологических процессов.

Разработка типовых технологических процессов состоит из двух основных этапов:

1) классификации приборов по общности технологических задач, решаемых при их сборке;

2) разработки типовых технологических процессов.

В основу классификации могут быть положены различные признаки, например: габариты прибора, его конструкция, основной вид и точность сборочных соединений, способы их осуществления и др. Должны учитываться и условия конкретного производства, его оборудование, оснастка, организационные формы сборки, величина производственного задания и др.

Классифицировать объекты сборки по типам лучше не по рабочим чертежам прибора, а по принципиальным кинематическим, оптическим, монтажным и подобным схемам или схемам сборки.

Использование таких схем позволяет одновременно рассматривать большое количество объектов сборки и выносить заключение о технологической общности независимо от некоторого конструктивного различия.

После подбора объектов производства по типам разрабатывают типовой процесс сборки для того изделия из данного типа, которое обладает наибольшим числом основных признаков. В типовых процессах фиксируют только принципиальную технологию, общую для всех сборочных единиц данного типа. При проектировании технологии для отдельной сборочной единицы процесс необходимо конкретизировать.

В карту типового процесса обычно заносят лишь основные операции, принципиально определяющие процесс сборки.

Различают два варианта типовых технологических процессов: оперативный и перспективный. *Оперативный* процесс типизируется с целью упорядочения существующей технологии. *Перспективный* типовой процесс предусматривает применение новых, более совершенных методов сборки, оборудования и оснастки. При этом могут быть включены конструкции оборудования и оснастки, которые еще не применяются в промышленности и требуют экспериментальной доработки. Эти процессы составляют на основе научных достижений и обобщения передовых идей. Они определяют перспективу развития технологии приборостроения, позволяют выявить и заказать необходимое оборудование, оснастку и аппаратуру.

30.11. Технологичность и серийнопригодность

Под *технологичностью* понимают совокупность свойств конструкции прибора, определяющих затраты труда, средств, материалов и времени при технической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации и ремонте по сравнению с соответствующими показателями однотипных конструкций приборов того же назначения.

При рассмотрении вопросов технологичности конструкции прибора необходимо решить две задачи:

- 1) отработка конструкции на технологичность;
- 2) оценка уровня технологичности.

Отработка конструкции прибора на технологичность направлена на повышение производительности труда, снижение затрат и сокращение времени на проектирование, технологическую подготовку производства, изготовление, техническое обслуживание и ремонт изделия при обеспечении необходимого его качества.

Отработка конструкции прибора на технологичность начинается на стадии ТЗ и продолжается вплоть до освоения в производстве, но наивысший эффект получается при отработке на ранних стадиях проектирования.

Рассмотрим некоторые рекомендации отработки конструкции на технологичность.

1. Конструкция должна состоять из отдельных сборочных единиц, что позволяет проконтролировать их до сборки и исключить дефектные компоненты, а также организовать параллельную и независимую сборку отдельных сборочных единиц. Конструкция прибора должна расчленяться на сборочные единицы таким образом, чтобы трудоемкость их сборки была приблизительно равна или кратна целому числу. Это позволяет синхронизировать операции при поточной сборке.

2. Следует использовать стандартизированные детали и типовые функциональные компоненты.

3. Следует стремиться к уменьшению количества деталей и сборочных единиц, использованию принципа кратчайшего пути для достижения требуемой точности, применению методов взаимозаменяемости. Не рекомендуются регулировки, пригонки, операции, содержащие длительные естественные процессы (сушку, проверку герметичности натеканием и т. п.).

4. Сборка должна осуществляться, по возможности, с использованием универсального инструмента без сложных стендов и приспособлений.

5. Необходимо предусмотреть возможность механизации и автоматизации сборки, доступность крепежных деталей для механизированных сборочных инструментов.

6. Следует стремиться к уменьшению числа крепежных деталей. Целесообразно применять сварку, расклепку, развальцовку, гибку и т. п.

7. Необходимы рациональная постановка размеров и выбор баз. Следует совмещать сборочные базы с измерительными.

8. Для автоматизированной сборки желательно, чтобы изделие имело базовую деталь, например корпус, к которому присоединяют отдельные детали.

Оценка уровня технологичности осуществляется для сравнения вновь спроектированных изделий с известными приборами аналогичного назначения, а также для определения путей создания специальной технологии сборки и ее автоматизации.

Показателем *серийнопригодности* служит вероятность нахождения выходных параметров прибора в заданных допусках на момент окончания процесса производства.

30.12. Проектирование сборочных приспособлений

Использование приспособлений позволяет повысить производительность, облегчить условия труда, снизить себестоимость изготовления прибора. В ряде случаев без приспособлений невозможно осуществить сборку вообще или получить заданную точность.

Основными факторами, влияющими на выбор схемы и конструкции приспособления, являются тип производства, нормы времени на выполнение операций, заданная точность сборки. Так, в единичном производстве проектирование и изготовление приспособления часто не оправданны, так как при малой партии изделий расходы могут не окупиться.

Проектирование приспособлений производят в следующем порядке:

1. По сборочному чертежу сборочной единицы устанавливают базовые поверхности, которые используются для крепления или фиксации сборочной единицы в приспособлении при выполнении данной операции.

2. Определяют условия собираемости деталей (допустимую величину смещения собираемых деталей).

3. Разрабатывают схему базирования деталей, обеспечивающую их собираемость, определяют погрешность базирования, сравнивают ее с допустимой.

4. Определяют точность изготовления сборочного приспособления.

5. Проектируют приспособление; путем расчета на прочность определяют размеры основных деталей; составляют рабочие чертежи. При выборе быстродействия приспособления необходимо учитывать заданную производительность.

Выбор базовых поверхностей. Базовая деталь должна иметь точные и надежные поверхности для связи со сборочным приспособлением, обладать необходимой жесткостью и прочностью. Необходимо выбрать положение базовой оси изделия, которое может быть вертикальным, горизонтальным или наклонным. При этом руководствуются соображениями максимального удобства и простоты операции, обеспечивающей заданное качество.

Определение условий собираемости – это выяснение предельно допустимых значений допусков на смещение друг относительно друга собираемых деталей.

Базирование деталей. Заданные условия собираемости деталей обычно реализовываются в нескольких вариантах. Наилучшим является такой, где погрешность относительного положения сопрягаемых деталей наименьшая. Величина погрешности зависит от выбранной схемы базирования, характера и состояния исполнительных поверхностей базирующих устройств.

Глава 31. ТИПОВЫЕ РАБОТЫ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ ПРИ СБОРКЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

31.1. Промывка механических деталей

Механические детали, непосредственно соприкасающиеся с оптическими деталями, а также механические детали (или часть их поверхности), не подлежащие отделке (окрашиванию, чернению, хромированию и т. д.), подвергаются промывке. Также промываются детали после окончания пригоночных работ.

Для промывки механических деталей применяют петролейный эфир, авиационный бензин, бензин второго сорта, ацетон.

Петролейный эфир является продуктом перегонки авиационного бензина и представляет собой летучую жидкость, которая кипит при температуре 40–70 °С, хорошо растворяет жир минерального, животного и растительного происхождения, применяется для промывки деталей, непосредственно соприкасающихся с оптическими деталями, а также для промывки деталей точных механических соединений. Указанные детали промывают последовательно в трех ванночках. Остальные детали промывают в бензине в два приема: предварительно в бензине 2-го сорта и окончательно – в авиационном бензине.

Промывку производят при помощи ультразвука или в бачках ершиками и волосяными щетками вручную, после чего детали сушат струей свежего воздуха.

31.2. Чистка оптических деталей

Различают следующие основные виды загрязнений оптических деталей:
пыль – твердые частицы, осевшие на поверхность стекла из воздуха;
осыпка – твердые частицы на поверхности стекла, оторвавшиеся от внутренних поверхностей деталей прибора (частицы лака, краски и т. п.);
мазки – отпечатки пальцев, капли смазки и т. д.;

капельный жировой налет – мельчайшие капельки жировых веществ.
Из всех видов загрязнений наиболее опасным является жировой налет, так как он со временем увеличивается.

На оптических деталях могут возникнуть биологические налеты – образования плесени на полированной поверхности стекла от применения прокладки из пробки и картона при высокой относительной влажности (более 80 %).

Для растворения загрязнений на оптических деталях применяют следующие вещества:

спирт этиловый ректификат C_2H_5OH (первый растворитель); растворяет смолы, оптические клеи и воскообразные вещества;

петролейный эфир (второй растворитель);

смесь петролейного эфира с этиловым спиртом (эфира 85–90, спирта 15–10 частей); применяется в качестве второго растворителя;

смесь этилового спирта с этиловым эфиром (спирта 85–75, эфира 15–25 частей); служит для обезжиривания инструмента, применяемого при чистке оптики.

Для чистки применяют следующие протирочные материалы:

вату гигроскопическую обезжиренную с содержанием жиров до 0,1 %;

салфетки фланелевые с содержанием жиров до 0,1 %;

кисточки беличьи.

В процессе чистки оптических деталей применяют:

– палочки и подставки для намотки тампонов ваты;

– пинцеты;

– ящики для хранения чистой и отработанной ваты;

– стеклянные банки с притертыми пробками для растворителей;

– ванночки для прополаскивания оптических деталей;

– резиновые грушу и присоску.

Чистку оптических деталей выполняют следующим образом. Каждую поверхность детали не менее трех раз протирают тампонами ваты, смоченными в спирте, и тампонами сухой ваты. Затем эти же поверхности таким же образом протирают тремя тампонами ваты, смоченными в смеси петролейного эфира и спирта или в петролейном эфире. После этого детали протирают насухо салфетками и кисточкой снимают пыль.

Металлическую пыль с оптической детали снимают тампоном сухой ваты или ватой, смоченной смесью. При чистке призм смесью предварительно обезжиривают нерабочие шлифованные поверхности. При чистке оптических деталей, находящихся в местах промежуточного изображения предметов (например, сетки), детали вместо протирания прополаскивают последовательно в двух-трех ванночках со смесью, после чего их высушивают в салфетках.

31.3. Выполнение разъемных и неразъемных соединений

31.3.1. Выполнение разъемных соединений

К разъемным соединениям относятся резьбовые, штифтовые, шпоночные и соединения стопорными винтами.

Резьбовые соединения могут быть подвижные и неподвижные. Подвижные соединения приведены на рис. 31,1, *а* и *б*. Они позволяют вести регулировку положения деталей 2 и 3 в пределах 2δ за счет зазора δ между отверстием в детали 2 и винтом (шпилькой) 1 с гайкой 5.

Винты с конической головкой (рис. 31.1, *в*) применяют для сборки узлов, в которых не предусматривается взаимное перемещение деталей (неподвижное соединение).

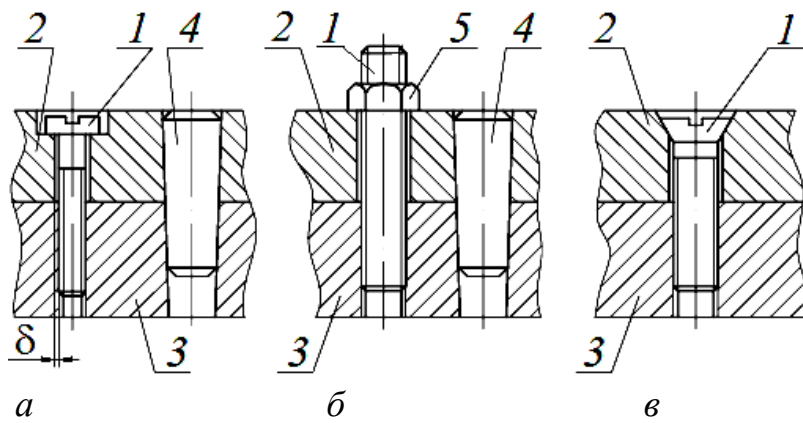


Рис. 31.1. Разъемные соединения

Для предотвращения возможного смещения деталей при эксплуатации прибора их фиксацию производят штифтом 4 (рис. 31.1, а, б). Штифт устанавливают после регулировки положения детали 2 относительно детали 3 в пределах зазора δ .

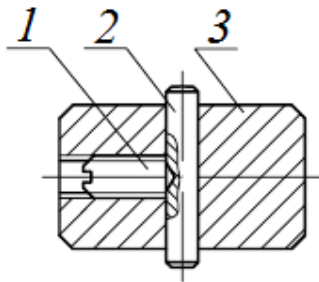


Рис. 31.2. Соединение деталей стопорным винтом

В оптических приборах часто используются соединения деталей *стопорными винтами* (рис. 31.2). Резьбовое отверстие в детали 3 обрабатывают до сборки.

После регулировки положения детали 3 через ее резьбовое отверстие высверливают на валу 2 коническое углубление, в которое входит конус стопорного винта 1.

Шпоночные соединения осуществляют для фиксации и закрепления зубчатых колес и шкивов на валах, а также для передачи вращения от приводов к исполнительным механизмам приборов. Соединения деталей шпонками включают плотную посадку шпонок в шпоночные гнезда оси или вала, установку и плотную посадку зубчатых колес и других деталей на валы и оси с последующей фиксацией их винтами, штифтами или другими деталями, обеспечивающими жесткое соединение. В тех случаях, когда деталь должна свободно перемещаться вдоль вала, используют направляющие шпонки, которые крепят на валу винтами.

В процессе сборки оптических приборов и узлов винтовые соединения предохраняют от саморазвинчивания. Для этого применяют следующие способы стопорения резьбовых соединений: контргайкой, стопорными винтами, разводными шплинтами, проволокой, кернением, пружинными и деформируемыми шайбами, заливкой клеями или смолой.

31.3.2. Выполнение неразъемных соединений

Неразъемными называют соединения, которые невозможно разобрать без разрушения соединенных деталей. К этому виду относятся соединения

заклепками, завальцовкой и развальцовкой, клейкой, сваркой и с гарантированным натягом.

Соединение деталей заклепками осуществляется путем установки заклепки в заранее просверленное отверстие соединяемых деталей и расклепывания (формообразования) замыкающей головки. Заклепка состоит из стержня 3 и закладной головки 4 (рис. 31.3). Заклепки бывают сплошными и пустотелыми. Процесс клепки основан на пластичности металла, поэтому заклепки изготавливают из деформируемых металлов и сплавов: малоуглеродистой стали, мягкой латуни и дюралюминия.

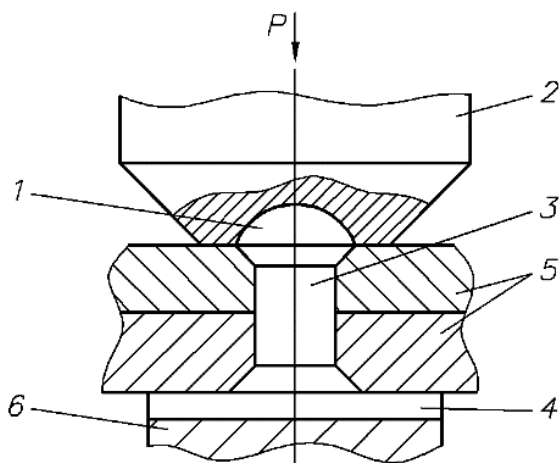


Рис. 31.3. Соединение деталей заклепкой

При клепке деталей 5 применяют следующие инструменты: подставку 6, обжимку 2, струбцины (на рис. 31.3 не показаны), слесарный молоток.

Для получения полукруглой головки 1 длина выступающей части заклепки должна составлять $1,5d$, а для потайной головки $(0,7-0,8)d$, где d – диаметр стержня заклепки.

Соединение деталей развальцовкой осуществляется путем раскатки кромки одной детали и плотного прижатия этой кромки к поверхности другой детали (рис. 31.4). Соединение применяется для сборки деталей, работающих с незначительными нагрузками, так как при этом соединении возможно проворачивание деталей друг относительно друга.

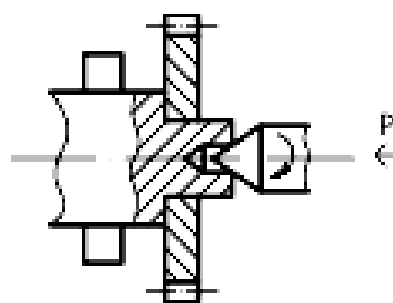


Рис. 31.4. Соединение деталей развальцовкой

Неподвижное соединение двух деталей путем запрессовки одной в другую, обеспечивающее прочное соединение без дополнительного крепления, называется *соединением с гарантированным натягом*.

Сущность метода заключается в том, что охватываемая деталь до сборки имеет больший размер, чем отверстие охватывающей. Такое соединение обеспечивает гарантированный натяг, так как возникают силы сцепления, препятствующие относительно смещению сопрягаемых деталей.

Поскольку натяг представляет собой разность между диаметрами сопрягаемых деталей, то в процессе запрессовки происходит их деформация. При значительной величине деформации могут образоваться трещины и произойти разрушение сопрягаемых деталей.

Технологический процесс соединения деталей с гарантированным натягом включает:

подготовку поверхностей сопрягаемых деталей, связанную с выполнением фасок для захода охватываемой детали в отверстие охватывающей; установку и ориентацию одной детали относительно другой; запрессовку прессом (или молотком) охватываемой детали с применением смазочных веществ.

31.4. Виды пригоночных работ и их выполнение

Необходимость выполнения пригоночных работ возникает из-за скопления ошибок изготовления механических и оптических деталей.

Пригоночные работы проводят на металлорежущих станках и слесарным способом. В оптическом приборостроении применяют собственно пригонку и притирку.

Пригонку деталей *на станках* осуществляют путем расточки отверстий оправ под сопрягаемые детали. Эти работы выполняют на прецизионных токарно-арматурных станках.

Пригонку деталей *слесарным способом* осуществляют путем шабрения, притирки и развертывания отверстий.

Шабрение – это снятие тонкой стружки металла с поверхности детали специальным режущим инструментом (шабером) при возвратно-поступательном движении руки. Шабрение проводят с целью создания плоскости поверхности детали для плотного ее прилегания к другим поверхностям.

Шабренная поверхность имеет следующие преимущества перед шлифованной:

более износостойка, так как не имеет шаржированных в поры абразивных зерен, ускоряющих процесс износа;

дольше сохраняет смазывающие вещества, что также повышает ее износостойкость и снижает коэффициент трения.

Перед началом шабрения выявляют подлежащие шабрению участки. Для этого применяют поверочную плиту, поверхность которой окрашивают. Обработываемой поверхностью деталь осторожно накладывают на поверхность плиты и после нескольких круговых движений снимают. В небольших углублениях обработываемой поверхности краска будет скапливаться, а в более углубленных местах ее вообще не будет. Таким образом, *белые* пятна – наиболее углубленные места, не покрытые краской; *темные* места – менее углубленные, в них скопилась краска; *серые* пятна – наиболее выступающие места, на них краска ложится тонким слоем, их и удаляют шабером в первую очередь.

Для обеспечения плотного прилегания сопрягаемых поверхностей деталей число точек контакта должно быть не менее трех на поверхности размером 25×25 мм, для создания герметичного соединения – не менее пяти. Процесс шабрения является трудоемкой работой, поэтому его по возможности заменяют шлифованием, притиркой, тонким точением.

Притиркой называют процесс тонкой обработки поверхности детали шлифующими материалами путем взаимных перемещений притираемых поверхностей. В качестве шлифующих материалов применяют пасты ГОИ (состав: парафин 10–12 %, олеиновая кислота и окись хрома 62–65 %).

Более подробно шабрение и притирка рассмотрены в п. 45.10.

31.5. Смазка оптических приборов

К смазкам предъявляются требования сохранения их свойств в интервале температур от +50 до –40 °С. Смазки делятся на консистентные, твердые и масла. Главными компонентами *консистентной* смазки являются вазелиновое масло и церезин. Вазелиновое масло снижает температуру замерзания, а церезин повышает температуру плавления смазки. Консистентная смазка предназначена для смазывания трущихся поверхностей механических соединений, близко расположенных к оптическим деталям.

Для смазывания механических соединений, испытывающих большие нагрузки, рекомендуются церезино-графитовые (твердые) смазки.

Смазка «Орион» предназначена для протирки внутренних поверхностей приборов с целью предохранения от осыпки.

Для консервации металлических деталей при длительном хранении применяют пушечную смазку.

Для смазывания осей лепестков затворов фотообъективов используют масло веретенное.

Все смазки, применяемые при сборке оптических приборов, не должны быть летучими и химически активными, вызывать образование налетов на оптике, не должны высыхать.

Смазывание узлов проводят после окончательной регулировки и обезжиривания трущихся поверхностей. Смазку на поверхности металлических деталей наносят при помощи шпателя (деревянной лопаточки), щетки или кисточки.

31.6. Герметизация оптических приборов

Герметизация представляет собой процесс уплотнения зазоров между поверхностями соприкасающихся деталей уплотнительными замазками и устройствами с целью защиты полостей узлов и приборов от влияния внешней среды. Уплотнительные замазки бывают мягкие, полутвердые и твердые.

Мягкая замазка применяется для заполнения зазоров шириной до 0,5 мм, заливки резьбовых соединений и уплотнения соединения поверхностей с большой площадью сопряжения.

Полутвердая замазка применяется для заполнения зазоров шириной более 0,5 мм и постановки защитных стекол.

Твердая замазка применяется в приборах, предназначенных для работы в тропиках.

Кроме этих замазок применяют специальные уплотнители типа «Герметик», который хорошо выдерживает температурные перепады от –60 до +100 °С, вибрационные и ударные нагрузки.

Замазки должны сохранять свои свойства в течение длительного времени, быть пластичными, неактивными, хорошо прилипать к поверхностям деталей, не должны усыхать.

Технологический процесс герметизации узлов и приборов включает следующие операции: обезжиривание поверхностей деталей, нанесение слоя замазки на сопрягаемые детали, плотное прижатие деталей крепежными элементами (винтами, болтами, резьбовыми кольцами) и удаление остатков уплотнителя с кромок деталей.

Уплотнительные замазки применяют, как правило, в неподвижных соединениях.

Если уплотнение замазками недопустимо, то для герметизации используют уплотнительные устройства в виде сжимаемых прокладок, манжет, сальников и мембран.

Герметичность соединения проверяют следующими способами:

путем нагнетания воздуха в прибор, погружения его в воду и обнаружения воздушных пузырьков;

путем нагнетания воздуха в прибор, смачивания соединительных швов мыльной водой и обнаружения мыльных пузырьков от выходящего из прибора воздуха;

путем создания избыточного давления воздуха в приборе и определения спада давления по манометру.

Глава 32. СБОРКА И РЕГУЛИРОВКА ТИПОВЫХ УЗЛОВ ПРИБОРОВ

32.1. Сборка и контроль направляющих

32.1.1. Виды направляющих и общие требования к их сборке

Некоторые детали и узлы приборов в процессе работы должны выполнять прямолинейные или вращательные движения в заданном направлении.

Детали, которые обеспечивают движение по сопрягаемым поверхностям других деталей в заданном направлении, называют **направляющими**.

Различают следующие виды направляющих:

по виду движения – прямолинейного и вращательного движений;

виду трения – направляющие с трением скольжения и с трением качения.

Направляющие вращательного движения с трением скольжения по цилиндрическим поверхностям применяют для узлов, вращающихся с не-

большими скоростями. Эти направляющие чувствительны к температуре, изменение которой вызывает линейное расширение, а вместе с ним – торможение и заклинивание сопрягаемых деталей. Это явление заставляет систематически подавать смазку в зазоры трущихся поверхностей.

Направляющие вращательного движения с трением скольжения по коническим поверхностям применяют в точных измерительных приборах, например, в теодолитах, окулярных штриховых головках и т. д.

Направляющие вращательного движения с трением скольжения по сферической поверхности применяют для закрепления в них шаровых пят приборов.

Направляющие вращательного движения с трением качения (рис. 32.1) применяют для узлов, требующих вращения с повышенной скоростью. Эти направляющие чувствительны к изменениям температуры и требуют незначительного количества смазки.

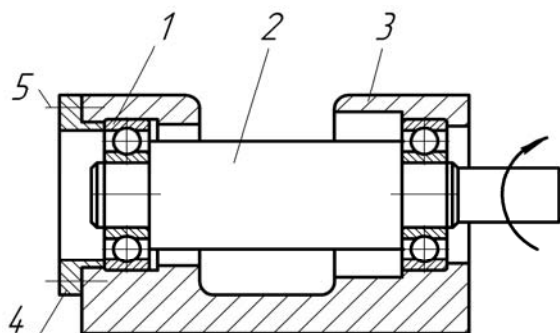


Рис. 32.1. Направляющая вращательного движения:
1 – подшипник шариковый; 2 – вал; 3 – корпус; 4 – крышка; 5 винт

Все виды направляющих должны отвечать следующим требованиям: иметь необходимые точность и плавность движения, малые трение и износ. Эти требования удовлетворяются за счет выбора материалов сопрягаемых деталей с одинаковым или близким коэффициентом линейного расширения, точной обработки и подготовки поверхностей направляющих, а также за счет применения качественных смазок.

32.1.2. Сборка узлов с направляющими прямолинейного движения с трением скольжения

Для качественной сборки узлов с направляющими прямолинейного движения с трением скольжения и качения важно решить основные конструктивные задачи: выбор нужного сочетания материалов, создание наиболее технологичной конструкции.

Хорошие результаты обеспечивают следующие сочетания материалов: сталь закаленная–чугун; сталь незакаленная или закаленная–пластмассы (текстолит, полиэтилен, карболит, капрон).

Для уменьшения объема пригоночных работ при сборке узлов с направляющими необходимо хорошо подготовить трущиеся поверхности сопрягаемых деталей шлифованием, тонким точением или фрезерованием с чистотой обработки поверхности $Ra = 0,32-1,25$ мкм. Это сокращает трудоемкость пригоночных работ.

Типовой технологический процесс сборки узла с направляющей типа ласточкин хвост ведется в следующей последовательности.

1. Собираемые детали 1, 2, 3 (рис. 32.2, а) зачищают после механической обработки.

2. Деталь 2 устанавливают в деталь 1, при этом деталь 2 с помощью планки 3 прижимают к трущимся плоскостям Б детали 1 с обеих сторон и щупом проверяют зазор между деталями 2 и 3 (рис. 32.2, б).

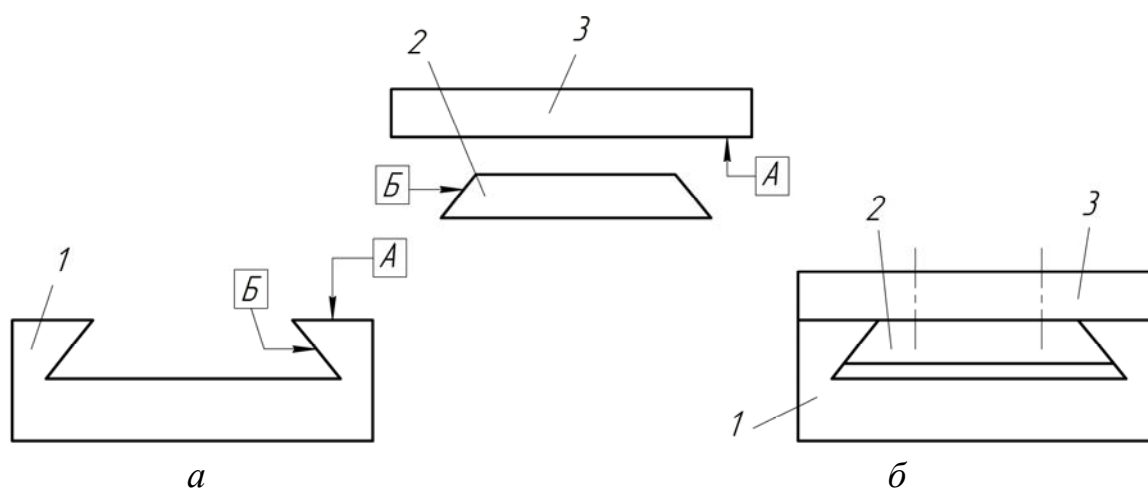


Рис. 32.2. Сборка узла с направляющей типа «ласточкин хвост»

3. При обнаружении зазора поверхности А подгоняют путем шабрения и последующей притирки плоскостей А и Б в деталях 1, 2, 3.

4. После притирки детали 2 и 3, не разбирая, выдвигают из детали 1, все промывают, смазывают, снова вставляют в деталь 1 (см. рис. 32.2, б) и проверяют плавность перемещения по направляющей.

Сборку узлов с направляющими прямолинейного движения других видов с трением скольжения ведут приблизительно в такой же последовательности с применением пригоночных работ, которые могут быть сокращены путем рационального выбора допусков и назначения класса чистоты обработки сопрягаемых поверхностей.

32.1.3. Сборка узлов с направляющими вращательного движения с трением скольжения и качения

Технология сборки узлов с направляющими вращательного движения с трением скольжения предусматривает качественную механическую обработку трущихся поверхностей и включает сборку направляющих с со-

прягаемыми деталями путем их совместной притирки и выдержки нужных зазоров с последующей промывкой и смазкой.

Сборку узла с направляющими вращательного движения с трением качения (см. рис. 32.1) осуществляют следующим образом.

1. Шарикоподшипники *1* комплектуют с валом *2* для посадки их на вал с предусмотренным натягом.

Посадку шарикоподшипников на вал выполняют по системе отверстия (отверстие постоянно) за счет поля допуска вала. Допуск на диаметр вала задают по шестому качеству точности для посадок переходных или с гарантированным натягом.

2. Шарикоподшипники напрессовывают на посадочные места (цапфы) вала *2* и наружные кольца подшипников запрессовывают в посадочные гнезда корпуса *3*. При этом используют специальные оправки для создания давления одновременно на торцы двух колец шарикоподшипника.

3. Левый шарикоподшипник закрепляют крышкой *4*, привернув ее винтами *5*.

4. Узел регулируют, обеспечивая легкость хода и за счет подрезки опорного торца крышки *4* выдерживая нужный осевой зазор, компенсирующий линейное расширение металла.

5. Узел чистят и смазывают.

32.1.4. Контроль направляющих

После сборки узлов с направляющими проверяют их качество.

В направляющих вращательного движения определяют радиальное и осевое биение. Для этого корпус индикатора закрепляют на неподвижной части узла или прибора. Касаясь чувствительным элементом индикатора проверяемой поверхности вращающейся детали, по шкале индикатора находят величину биений. Для повышения точности измерения применяют более чувствительные измерительные приборы.

Направляющие прямолинейного движения проверяют по прямолинейности хода перемещающейся детали. Для контроля этого параметра наиболее часто используют лекальную линейку и индикатор часового типа. Контроль осуществляют следующим образом (рис. 32.3).

1. Лекальную линейку *2* устанавливают на плоскость перемещающейся детали *1* параллельно ее ходу. При этом лекальную линейку закрепляют мастикой. Чувствительный элемент *3* индикатора приводят в соприкосновение с линейкой.

2. Перемещая деталь *1*, лекальную линейку устанавливают параллельно направляющим по одинаковому отсчету индикатора в двух крайних точках грани лекальной линейки.

3. Перемещая деталь *1*, проверяют прямолинейность ее движения на всем пути перемещения. При этом показание на шкале индикатора должно быть неизменным, в противном случае имеет место непрямолинейность.

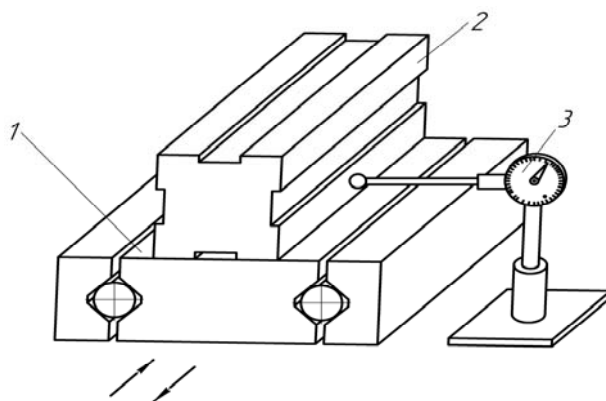


Рис. 32.3. Схема контроля прямолинейности направляющих прямолинейного движения

32.2. Уравновешивание подвижных частей приборов

Статическое уравновешивание

Под статической неуравновешенностью детали или узла понимают несовпадение центра тяжести (ЦТ) детали или узла с осью его вращения. Задачей статического уравновешивания является приведение ЦТ узла на его ось вращения. Такое уравновешивание называется *статическим* потому, что его производят в статическом режиме. Если узел весом G , у которого ЦТ смещен от оси вращения на расстояние r , установить на опоры типа «ножей» (рис. 32.4), то под действием момента статической неуравновешенности $M_{сн} = Gr$ узел будет поворачиваться (проявлять маятниковость) так, чтобы ЦТ узла установился по вертикали ниже точки (или оси) его опоры. Удаляя или добавляя некоторую массу металла к той или иной части, можно добиться его статической уравновешенности.

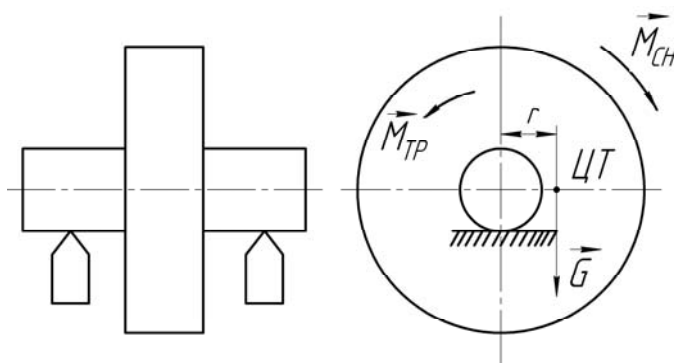


Рис. 32.4. Схема определения статической неуравновешенности

Статически уравновешенный узел, установленный на некоторых опорах, сохраняет равновесное состояние (не проявляет маятниковости) в любом угловом положении. Статически уравновешиваются неврещающиеся или медленно вращающиеся узлы приборов, а также относительно быстро

вращаются детали типа дисков, у которых диаметр D значительно больше ширины B ($D : B \geq 10$). В конструкции этих узлов имеются специальные элементы для уравнивания: легко подрезаемые свинцовые грузы, подвижные винты и гайки с устройствами их контровки в требуемом положении, места для нанесения припоя и т. д.

Для повышения точности статического уравнивания применяют более сложные приспособления. Так, например, для превращения момента трения покоя $M_{\text{тр}}$ в момент трения движения на приспособлениях типа ножей устанавливают малогабаритные электродвигатели с эксцентричной массой на валу. При работе такого двигателя возникают вибрации, уменьшающие моменты трения покоя до момента трения движения. Этой же цели служат устанавливаемые на относительно легких приспособлениях различные реле, которые при питании переменным током создают вибрацию (зуммеризацию) приспособлений.

Еще большую точность статического уравнивания можно обеспечить на установках, использующих эффект Жуковского, заключающийся в следующем. Для того чтобы какое-то тело могло перемещаться по плоскости S (рис. 32.5) с небольшой скоростью V_p под действием силы P , преодолевая значительно большую силу трения F_T , телу от внешнего источника энергии сообщается возвратно-поступательное движение со скоростью $V_{\text{в-п}}$, направленное перпендикулярно силе P и скорости V_p . Если скорость $V_{\text{в-п}}$ значительно больше V_p , то их сумма V_{Σ} незначительно отличается по величине и направлению от скорости $V_{\text{в-п}}$. Сила трения F_T оказывается направленной против суммарного вектора V_{Σ} скоростей. Составляющая F_p силы трения F_T , направленная против силы P , может быть доведена до получения неравенства $|F_p| < P$ за счет увеличения скорости $V_{\text{в-п}}$ от внешнего источника энергии.

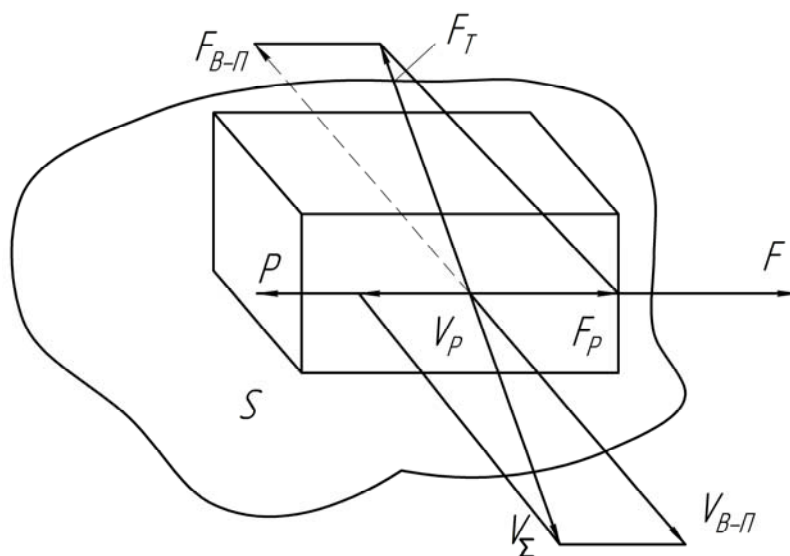


Рис. 32.5. К объяснению эффекта Жуковского

32.3. Сборка оптических деталей с механическими

32.3.1. Особенности сборки оптических деталей с механическими

При сборке в момент закрепления оптических деталей в оправы необходимо, по возможности, исключать загрязнение оптических поверхностей инструментом и руками. После соединения оптических деталей с механическими проводят чистку оптики.

По окончании сборки и юстировки положение оптических деталей должно оставаться постоянным, что обеспечивается выбором соответствующего типа крепления, а также фиксацией крепежных деталей стопорными винтами и штифтами.

При креплении оптических деталей недопустима их деформация, наличие которой вызывает внутренние напряжения в стекле, ухудшающие качество изображения оптических приборов. Чтобы исключить данную деформацию деталей, можно устанавливать их, например, на три точки (площадки), укрепив прижимными планками и винтами. При таком креплении легче обеспечить плоскость базовых поверхностей трех площадок оправы, чем всей поверхности ее соприкосновения с оптической деталью. Метод крепления и базирования на три точки часто применяется при сборке узлов с точными зеркалами.

В ходе сборки оптических приборов, как правило, возникает необходимость в дополнительной юстировке их отдельных элементов. Поэтому в конструкции приборов необходимо предусматривать юстировочные устройства для плавного регулирования положения оптических деталей в узле и приборе в целом.

32.3.2. Виды крепления оптических деталей

В зависимости от назначения оптических деталей и узлов в приборах оптические детали закрепляют в механические завальцовкой, с помощью резьбовых и пружинящих проволочных колец, жестких и пружинящих планок, а также клеем и герметиком.

Завальцовка применяется для жесткого неразборного соединения круглых оптических деталей с оправами. Она является простым, надежным и экономичным способом соединения механических деталей с оптическими (линзами, сетками). При завальцовке край металлической оправы должен соприкасаться с фаской оптической детали, а не с ее полированной поверхностью и плотно охватывать деталь по всей окружности. Подготовка оправы под завальцовку заключается в проточке ее наружного края, снятии фаски и зачистке наждачной и крокусной бумагами (рис. 32.6).

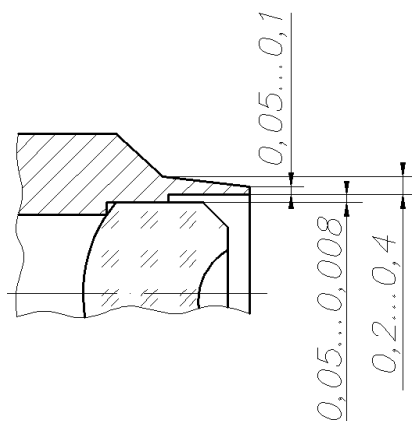


Рис. 32.6. Подготовка оправ под завальцовку

Завальцовку оптических деталей проводят на токарно-арматурных станках вручную при помощи специальных роликов.

При подготовке к завальцовке оправы отделка ее наружной кромки нарушается, и она становится блестящей. Во избежание появления отражений и бликов от блестящей поверхности кромки оправки ее покрывают фосочной эмалью.

Процесс завальцовки должен обеспечивать прочное крепление линз в оправе, не вызывая натяжения и деформации оптических деталей, ухудшающих качество изображения. Поэтому все завальцованные в оправы линзы проверяют на качество изображения.

Крепление оптических деталей *резьбовым кольцом* применяют для разборных соединений. Оптическую деталь укрепляют в оправе резьбовым кольцом, которое стопорят стопорным винтом.

При температурных перепадах вследствие разности коэффициентов линейного расширения материалов оправ и стекла возникают дополнительные деформации, способствующие образованию внутренних напряжений в стекле. Поэтому для таких условий применяют крепление с *компенсационными упругими кольцами*. Эти кольца устанавливают между резьбовым (зажимным) кольцом и линзой, что обеспечивает равномерный прижим оптических деталей.

Технологический процесс крепления оптических деталей с компенсационным кольцом ведется в следующей последовательности:

1. Линзу устанавливают в посадочное отверстие оправы и в случае необходимости используют водонепроницаемую замазку.

2. Промежуточное кольцо и линзу помещают в оправу, выдерживая воздушный промежуток между оптическими деталями за счет толщины промежуточного кольца.

3. Устанавливают компенсационное кольцо, ввинчивают резьбовое кольцо и стопорят его винтом.

В процессе сборки подобных узлов тщательно чистят оптические детали, соблюдая аккуратность при установке линз и креплении их резьбовым кольцом, чтобы не вызывать деформации и загрязнения оптики.

Существует крепление оптической детали *пружинящим проволочным кольцом*, которое можно применять в случае неотчетственных оптических деталей, например, защитных стекол и светофильтров. В процессе такого крепления оптическую деталь помещают в посадочное отверстие оправы и сжатое разрезанное пружинящее кольцо вводят в канавку оправы таким образом, чтобы при его разжиге в канавке торцом кольца обеспечивался плотный прижим оптической детали. При этом кольцо должно утопать в канавке на половину диаметра проволоки, из которой изготовлено кольцо.

Крепление оптических деталей *клеем* нашло применение для неразборных соединений в тех случаях, когда другими способами невозможно закрепить детали из-за их малых размеров или чувствительности оптической детали к деформациям при механическом креплении.

Хорошее качество склейки оптических деталей с механическими обеспечивает эпоксидный клей ОК-50 и полиуретановый клей ПУ-2. Меньшее напряжение, чем указанные клеи, обеспечивает крепление *герметиком*. Это соединение вследствие упругости герметика выдерживает резкие колебания температуры и значительные механические воздействия.

Технологический процесс склейки оптических деталей с механическими включает следующие операции:

- установку оптической детали в посадочное отверстие оправы;
- нанесение нужного слоя клея на цилиндрическую поверхность и между фасками сопрягаемых деталей;
- выдержку сборки при определенной температуре для отвердевания клеевого шва.

При чистке поверхностей оптических деталей, закрепленных клеем, следят за тем, чтобы во избежание расклейки шва растворители не оставались на клеевом соединении долгое время.

32.4. Сборка и юстировка объективов

32.4.1. Типы конструкций объективов и общие требования к их сборке

Различают следующие основные типы конструкций объективов:

1. Объективы «насыпной» конструкции, в которых линзы в оправе центрируют с максимально возможной точностью относительно посадочных поверхностей оправы (центрирование по точкам автоколлимации) и затем с минимально возможным зазором устанавливают в общий корпус объектива без дополнительной юстировки.

2. Объективы со свинчивающимися оправами, сопрягаемые диаметры линз и оправ которых изготавливают по калибрам и соединяют между собой с минимально допустимыми зазорами. Оправы с линзами соединяют с корпусом объектива резьбой без дополнительной юстировки.

3. Объективы единичных и мелкосерийных приборов, детали которых подгоняют в процессе сборки, сопровождаемой юстировкой.

Процесс сборки объектива можно разделить на два этапа: предварительную и окончательную сборку.

Предварительная сборка включает в себя:

подготовку механических деталей (промывку и чистку деталей);

сборку механических узлов объектива (ирисовой диафрагмы, фокусировочной оправы объектива);

установку и крепление линз в оправе и сборку оправ с линзами в корпусе объектива, при которой обеспечивают необходимую величину межлинзовых воздушных промежутков.

Окончательная сборка включает в себя:

чистку линз в оправе;

сборку оправ с линзами в корпусе объектива и центрирование объектива;

сборку механизмов, располагающихся на корпусе объектива;

выполнение рабочего расстояния объектива;

окончательную чистку внешних оптических деталей объектива;

контроль параметров объектива.

32.4.2. Сборка объективов зрительных труб

Объективы малых и средних диаметров, как правило, склеивают, а объективы большого диаметра собирают с воздушными промежутками между линзами. Склеивку объективов обычно выполняют в оптическом, а сборку объективов с воздушными промежутками – в сборочном цехе. Наличие клиновидности воздушного промежутка между несклеиваемыми линзами в процессе сборки объектива вызывает кому на оси. Для контроля этой клиновидности удобно применить метод Д. Д. Максудова (рис. 32.7).

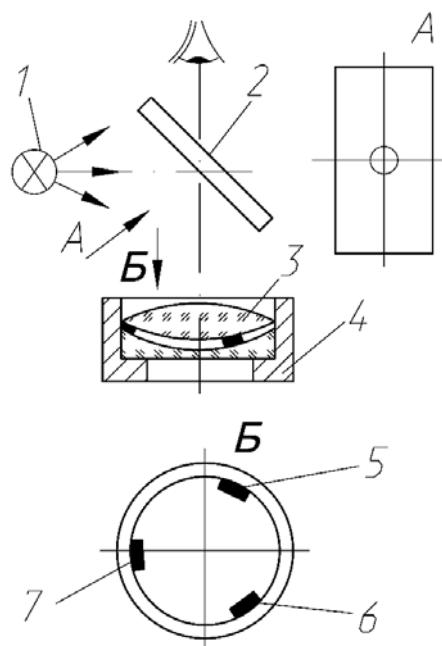


Рис. 32.7. Схема установки Д. Д. Максудова

На систему линз 3 в оправе 4, между которыми помещаются три равнотолщинные прокладки 5, 6, 7, направляют свет от ртутной лампы 1 с помощью экрана 2 из белой бумаги, а через отверстие в его центре наблюдают интерференционные кольца, возникающие в воздушном слое между линзами. Предварительно отверстие экрана помещают на ось объектива, следя за тем, чтобы отражения перекрестия (центр перекрестия совпадает с центром отверстия в экране) от всех поверхностей линз располагались в створе. Если при этом центр колец не совпадает с центром перекрестия, то воздушный промежуток имеет клиновидность.

32.4.3. Сборка микро- и фотообъективов

На сборку поступают оправы линз, окончательно обработанные по наружному диаметру и имеющие припуск для обработки посадочного отверстия под линзу. На токарном станке, имеющем точный шпиндель (без радиального и осевого биений), закрепляют оправку и растачивают в ней отверстие под наружный диаметр оправ линз; затем в полученное отверстие оправки устанавливают оправу под первую линзу, зажимают ее гайкой и растачивают в ней посадочное отверстие под конкретную линзу. При сборке склеенных линз (4 и 3, рис. 32.8) оправу растачивают с возможно меньшим зазором по диаметру флинтавой (отрицательной) линзы. Расточку ведут на глубину, обеспечивающую получение необходимого воздушного зазора между линзами.

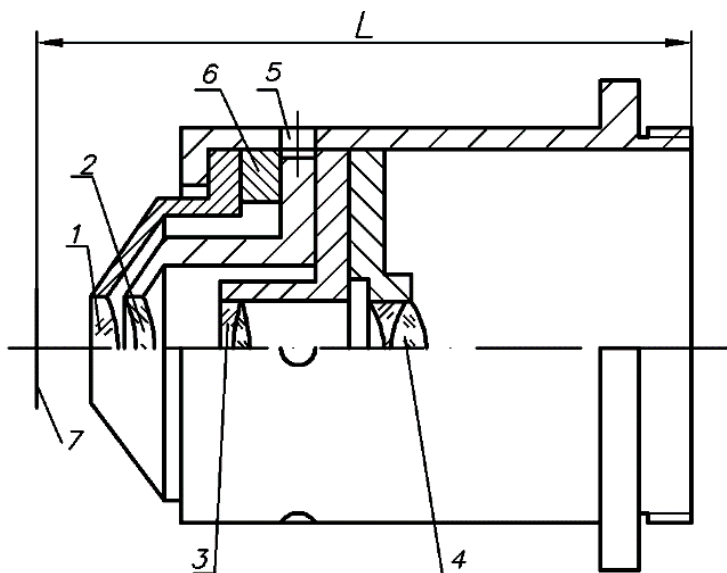


Рис. 32.8. Микрообъектив

В расточенную оправу на посадочное место линзы наносят тонкий слой пихтового бальзама, подогревают стенки оправы, чтобы бальзам расплавился, и вставляют линзу в оправу. Бамбуковой палочкой нажимают на линзу и ее наружную поверхность центрируют относительно оси шпинделя до затвердевания бальзама. Внутренняя поверхность линзы самоцен-

трируется, так как опирается на расточенный без биения посадочный буртик оправы. Центрирование линзы в целом проверяют по биению изображения источника света при вращении шпинделя. Если биение отсутствует, то линзу завальцовывают.

Фронтальную 1 и менисковую 2 линзы центрируют и завальцовывают таким же образом, но в оправу их вклеивают шеллачным клеем, обеспечивающим герметичность иммерсионного объектива.

Отцентрированные и закрепленные в оправках линзы после чистки собирают в корпусе и объектив проверяют по качеству изображения точки. Если обнаруживается сферическая аберрация, то с помощью буферных колец 6 изменяют воздушный промежуток между фронтальной 1 и менисковой 2 линзами. Кóму на оси объектива устраняют поперечными сдвигами менисковой линзы 2 (с помощью винтов через отверстия 5), диаметр оправы которой в несколько меньше (примерно на 0,2 мм), чем у оправ остальных линз. Астигматизм компенсируют взаимным разворотом линз вокруг оптической оси.

Стандартное расстояние $L = 33 \pm 0,02$ мм от плоскости предмета 7 до опорного торца корпуса обеспечивается подрезкой этого торца.

Фотообъективы изготавливаются насыпного и свинчиваемого типов. Объективы первого типа собирают как и микрообъективы. Сборку объективов второго типа начинают с механической сборки, а именно: на закрепленную и отцентрированную на станке оправку с внутренней технологической резьбой ввинчивают первую оправу и растачивают в ней посадочное отверстие под первую линзу; затем в эту же оправку станка ввинчивают вторую оправу и растачивают в ней посадочное отверстие под вторую линзу и т. д. Глубину проточки каждой оправы для объективов обоих типов рассчитывают, исходя из толщины (по центру) конкретной линзы и требуемого воздушного промежутка между соседними линзами. После пригонки и маркировки все оправы отделяют, обезжиривают и подают на окончательную сборку.

В свинчивающихся объективах линзы крепятся в оправках завальцовкой с центрировкой их по блику, за исключением одной линзы, крепящейся прижимным кольцом, что позволяет уточнить центрировку объектива разворотом линзы, закрепленной этим способом.

32.5. Сборка и юстировка окуляров

32.5.1. Проверка диоптрийной установки окуляров

Неподвижные окуляры приборов устанавливают относительно сетки на 0,5–1 дптр. Выбор такого значения диоптрийной установки окуляров, не имеющих диоптрийной подвижки, обусловлен тем, что наблюдатели, пользующиеся этими приборами, имеют нормальное зрение с небольшой близорукостью (до –1 дптр) при ненапряженных мышцах глаза.

Для окуляров, не имеющих подвижки, диоптрийную установку исправляют подрезкой опорного торца корпуса окуляра (или перемещением сетки) на величину

$$\Delta = \frac{f_{\text{ок}}^2 D}{1000}, \text{ мм,}$$

где $f_{\text{ок}}$ – фокусное расстояние окуляра, мм;

D – показание шкалы диоптрийной трубки со знаком.

Для проверки диоптрийной установки *подвижных* окуляров служит диоптрийная трубка. Передней частью эту трубку (первоначально настроенную) размещают вплотную к проверяемому окуляру и, перемещая объектив трубки, добиваются резкости изображения сетки окуляра. При этом отсчет по шкале диоптрийной трубки укажет диоптрийную установку окуляра в данном положении. Если показания шкалы диоптрийной трубки и диоптрийной шкалы испытуемого окуляра не совпадают, то показание шкалы окуляра необходимо исправить, отпустив стопорные винты и установив его шкалу по показанию диоптрийной трубки.

32.5.2. Юстировка окуляров бинокулярных приборов

Для обеспечения правильной работы бинокулярного прибора к его окулярам дополнительно предъявляются следующие требования:

– оптическая ось вращающегося окуляра должна совпадать с осью вращения окуляра;

– фокусные расстояния окуляров должны быть одинаковыми.

Несовпадение оси вращения и оптической оси окуляра приводит к изменению направления пучков лучей, выходящих из окуляра при его повороте, а следовательно, к нарушению параллельности визирных осей труб бинокулярного прибора.

Разность увеличения окуляров, т. е. разность их фокусных расстояний, приводит к двоению изображения и ошибке измерения. Допустимая разница фокусных расстояний окуляров наблюдательных бинокулярных приборов не должна превышать 2 %. В *простых* окулярах ее обеспечивают комплектацией линз окуляра по толщинам, а в *сложных* окулярах, кроме этого, – и изменением междулинзовых воздушных промежутков при сборке.

32.6. Сборка и юстировка систем переменного увеличения

Системы переменного увеличения делятся на две основные группы: с прерывным (ступенчатым) изменением увеличения и непрерывно меняющимся увеличением (панкратические).

Непрерывное изменение увеличения панкратических систем достигается перемещением в них двух компонентов А и Б (рис. 32.9, а), по опре-

деленному закону так, что расстояние l между этими компонентами непрерывно меняется (рис. 32.9, б). Закон этого движения задается пазами 1 и 2 в корпусе 3 (см. рис. 32.9, а). Винты 4 закреплены в оправах компонентов А и Б, поэтому при вращении корпуса 3 они будут скользить по пазам 1 и 2, а компоненты А и Б – перемещаться по оси системы.

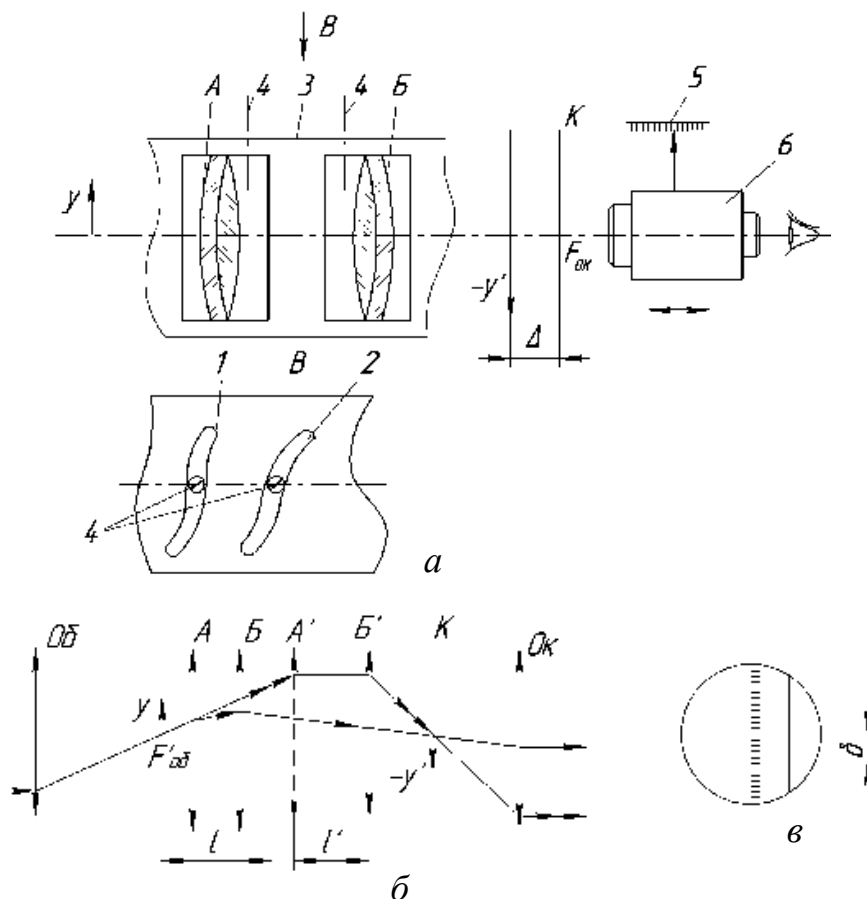


Рис. 32.9. Панкратическая система

Юстировкой системы необходимо добиваться, чтобы на всем интервале перемещения компонентов А и Б изображение y' предмета y оставалось в фокальной плоскости K окуляра (см. рис. 32.9, б) и в центре поля зрения, а увеличение изменялось в заданном диапазоне.

Осевое смещение Δ плоскости изображения можно оценить либо по диоптрийной трубке, если юстировка системы проводится с объективом и окуляром, либо при помощи микроскопа б (см. рис. 32.9, а) с внешней шкалой 5, если юстируется только узел компонентов А и Б.

Поперечное смещение δ (рис. 32.9, в) изображения оценивается по сетке микроскопа. Это смещение возникает в случае, если оптические оси обоих компонентов не совпадают с геометрической осью трубы.

Характерные дефекты сборки следующие:

- неправильное начальное положение компонентов А и Б;
- неточности изготовления пазов 1 и 2, в результате чего нарушается закон движения линз.

32.7. Сборка и юстировка осветительных систем

Основной задачей осветительной системы (рис. 32.10) является направление света от ее источника на определенную деталь прибора (щель, сетку, кадр и т. д.) с целью создания заданной освещенности в пределах некоторой площади детали.

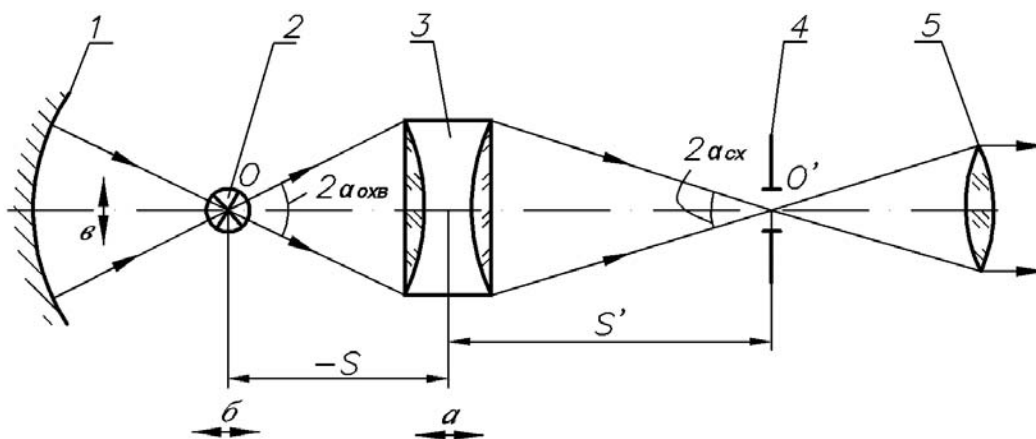


Рис. 32.10. Осветительная система

Основными элементами осветительных систем являются источник света 2 и конденсор 3. Довольно часто эти системы имеют еще рефлектор 1. Простейшие осветительные системы имеют только один источник света.

В процессе сборки осветительных систем приходится обеспечивать расстояние S и S' , угол охвата $2\alpha_{охв}$ и угол сходимости $2\alpha_{сх}$ (источник света и конденсор должны быть центрированы относительно детали 4, на которую направляется свет, и объектива 5 системы прибора). Для достижения этих целей конструкция осветительного узла должна позволять проводить перемещения: осевые (по стрелкам a и b) — для источника света и конденсора и перпендикулярно оси системы (по стрелке v) — для источника света.

Глава 33. КОНТРОЛЬНО-ЮСТИРОВОЧНЫЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

33.1. Коллиматоры. Устройство и назначение

Коллиматором называется оптическая система, предназначенная для создания параллельного пучка лучей, т. е. имитирующая бесконечно удаленный предмет.

Коллиматор (рис. 33.1) состоит из длиннофокусного объектива 4, в фокальной плоскости которого помещен тест-объект 3 (точечная или щелевая диафрагма, сетка, шкала, мира), подсвечиваемый осветительной системой 2. В качестве последней может использоваться конденсор со сменными светофильтрами и лампочкой накаливания или же матовое стекло с лампочкой накаливания.

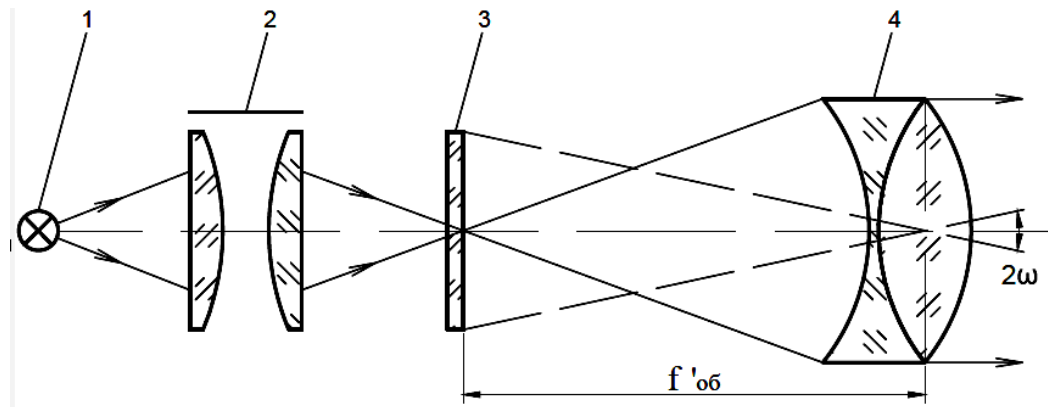


Рис. 33.1. Оптическая схема коллиматора

Для измерений и установки на бесконечность коллиматор снабжен кремальерным механизмом с отсчетной шкалой (перемещает тест-объект вдоль оптической оси коллиматора).

Объектив, тест-объект и осветительное устройство монтируют в металлической или иной трубе, исключая движение воздуха и резкие температурные колебания.

Объектив является основным компонентом коллиматора. Он должен обеспечивать более высокое качество изображения, чем контролируемая система. Чаще всего в коллиматорах применяют высококачественные двухлинзовые объективы (склеенные или несклеенные), хорошо скорректированные на хроматическую и сферическую аберрации. Полевые аберрации (кома, астигматизм, дисторсия) также исправляются в пределах углового поля объектива.

Величина фокусного расстояния объектива коллиматора должна занимать одно из значений нормального ряда (наиболее применяемые коллиматоры): 400, 600, 1000, 1200, 1600, 2500 и 3000 мм. Длиннофокусные коллиматоры обеспечивают большую точность измерений.

Угловое поле 2ω короткофокусных объективов коллиматоров составляет в среднем $8-12^\circ$, у длиннофокусных объективов с $f' \geq 600$ мм $2\omega = 1-3^\circ$.

Относительное отверстие объективов коллиматоров $D/f' = 1:4-1:15$.

Для уменьшения влияния хроматической аберрации объектива коллиматора применяются коллиматоры с зеркально-линзовыми или зеркальными объективами. Особенность этих объективов состоит в том, что у них отсутствует хроматическая аберрация, а сферическая имеется в допустимых пределах.

33.2. Установка коллиматора на бесконечность

33.2.1. Установка коллиматора на бесконечность с помощью автоколлимационного окуляра и плоского зеркала

К тест-объекту 4 (рис. 33.2), устанавливаемому в фокусе объектива коллиматора 5, приставляют автоколлимационный окуляр 1 с полупро-

зрачным зеркалом 3, а перед объективом коллиматора устанавливают эталонное зеркало 6.

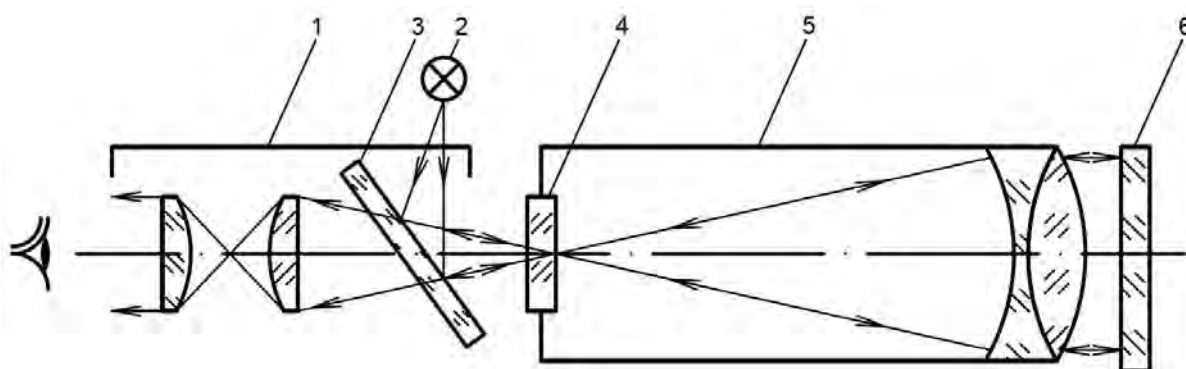


Рис. 33.2. Схема установки коллиматора на бесконечность с помощью автоколлимационного окуляра и плоского зеркала

Если в фокусе объектива коллиматора 5 требуется установить, например, миру 4, необходимо провести следующую работу: осветить миру с помощью автоколлимационного окуляра 1 и, поворачивая и наклоняя зеркало 6, добиться того, чтобы падающий на зеркало 6 из объектива коллиматора 5 пучок лучей возвратился обратно на миру 4. С этой целью зеркало 6 можно предварительно приложить к оправе объектива коллиматора 5. Затем окуляр 1 передвигают по оси до момента получения резкого видения мира 4 (фокусировка по глазу). После этого наблюдают автоколлимационное изображение мира 4 (отраженное от зеркала 6) и, если оно оказывается нерезким, необходимо совместно передвигать миру 4 и окуляр 1 по оси коллиматора до получения резкого автоколлимационного (отраженного от зеркала 6) изображения мира в плоскости самой мира. В этот момент мира будет находиться в фокусе объектива коллиматора, что соответствует установке его на бесконечность.

Данный способ установки коллиматора на бесконечность является наиболее чувствительным и точным, поскольку в случае установки тест-объекта на расстояние $\pm x$ относительно фокуса коллиматора наблюдаемая нерезкость (расстояние между тест-объектом и его автоколлимационным изображением) будет $\pm 2x$, т. е. удвоенной.

33.2.2. Установка коллиматора на бесконечность с помощью пентапризмы и наблюдательной трубы

Перед объективом коллиматора 2 (рис. 33.3) пентапризму 3 располагают одной стороной прямого угла к объективу коллиматора, а другой – к объективу наблюдательной трубы 4, оптическая ось которой примерно перпендикулярна к оптической оси коллиматора. Тест-объект 1 освещают и положение трубы 4 регулируют так, чтобы выходящий из коллиматора пучок лучей пошел по оси трубы 4 и на ее сетке 5 образовал изображение тест-объекта 1.

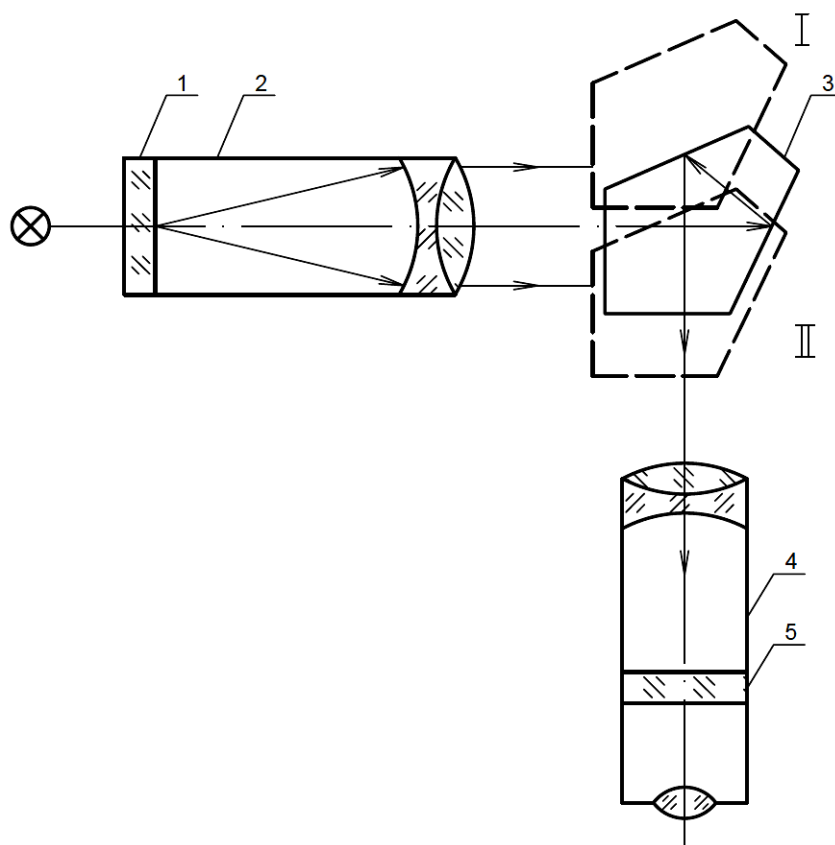


Рис. 33.3. Схема установки коллиматора на бесконечность с помощью пентапризмы и наблюдательной трубы

Сдвигая пентапризму в одно из крайних положений I в пучке лучей коллиматора, замечают расположение изображения тест-объекта 1 относительно шкалы сетки 5 трубы 4. После этого пентапризму передвигают в другое крайнее положение II и повторно замечают расположение изображения тест-объекта 1 относительно шкалы сетки 5. Если изображение тест-объекта при обоих крайних положениях пентапризмы оказывается неподвижным, то тест-объект 1 расположен в фокусе объектива коллиматора 2 и последний установлен на бесконечность. Если же изображение тест-объекта перемещается по сетке 5 наблюдательной трубы 4 при передвижении пентапризмы из одного положения в другое (см. рис. 33.3), то необходимо изменить положение тест-объекта 1 до получения его неподвижного изображения относительно сетки 5.

33.2.3. Установка коллиматора на бесконечность с помощью зрительной трубы

Эталонную зрительную трубу 3 (рис. 33.4) приставляют объективом к объективу коллиматора 2. Передвигая тест-объект 1 вдоль оси коллиматора 2, добиваются резкого изображения объекта на сетке 4 зрительной трубы 3, что будет соответствовать расположению тест-объекта в фокусе объектива коллиматора.

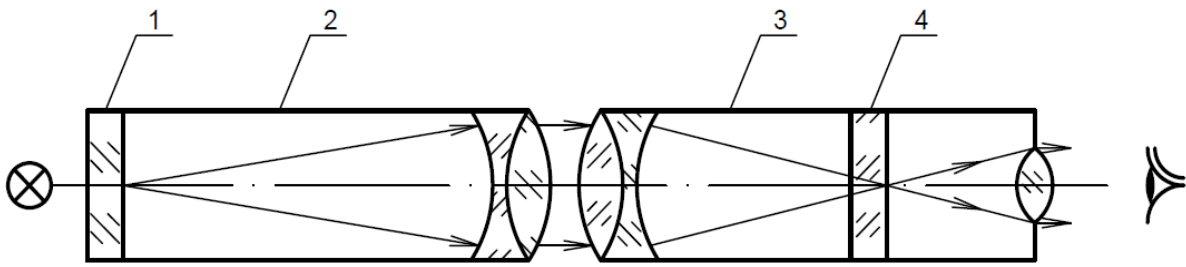


Рис. 33.4. Схема установки коллиматора на бесконечность с помощью зрительной трубы

Аналогично производится установка коллиматора на бесконечность по другому установленному на бесконечность коллиматору. В этом случае через окуляр, приставляемый к сетке настраиваемого коллиматора, наблюдают изображение сетки другого (настроенного) коллиматора. Резкость видения обеих сеток должна быть одинаковой.

Ошибку Δ_1 установки сетки настраиваемого коллиматора можно определить из соотношения

$$\Delta_1 = \left(\frac{f'_1}{f_2} \right)^2 \Delta_2, \quad (33.1)$$

где f'_1 и f_2 – фокусные расстояния объективов соответственно настраиваемого и эталонного коллиматоров;

Δ_2 – ошибка установки сетки в эталонном коллиматоре.

Отсюда видно, что ошибка установки сетки обратно пропорциональна квадрату фокусного расстояния объектива эталонного коллиматора.

Выражение (33.1) справедливо и для случая установки сетки при помощи зрительной трубы.

Существуют и другие методы установки коллиматора на бесконечность, среди которых можно отметить установку по бесконечно удаленной точке (по звезде или по предмету, удаленному на значительное расстояние).

33.3. Центрирование коллиматора

Контроль центрировки и центрирование коллиматоров и зрительных труб выполняются с помощью другого коллиматора, а также центрировочной трубкой (для коллиматоров с большим объективом).

При центрировании коллиматора и зрительных труб по другому коллиматору последний сам должен быть точно центрирован. Оптические оси коллиматоров должны быть параллельны, для чего оба прибора устанавливают либо горизонтально, например при помощи уровней 3 и 4 (рис. 33.5), либо вертикально при помощи отвеса.

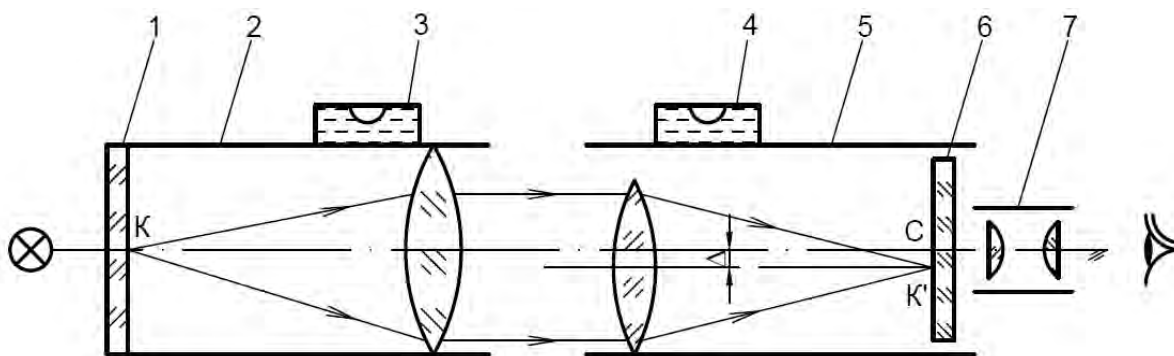


Рис. 33.5. Схема центрирования коллиматора

Из рис. 33.5 видно, что если центровка коллиматора 5 нарушена (например, смещением объектива на величину Δ), то изображение перекрестия K сетки 1 эталонного коллиматора 2 будет не в центре C сетки 6, а в точке K' , т. е. сместится на величину децентрировки, которая отсчитывается по сетке 6 через окуляр 7.

Контроль центровки и центрирование коллиматора при помощи центрировочной трубки выполняются следующим образом. Центрировочная трубка (рис. 33.6, а) представляет собой телескопическую систему, имеющую фланец А с тремя винтами с пластмассовыми (желательно агатовыми) наконечниками. Трубка устанавливается винтами на объектив коллиматора в положение I таким образом, чтобы два винта (например, 1 и 2) фланца трубки плотно касались внутренней поверхности края оправы объектива коллиматора (рис. 33.6, б). Поворачивая винты, добиваются совмещения изображения центра C_K перекрестия сетки проверяемого коллиматора с перекрестием C_T сетки центрировочной трубки. После этого, соблюдая нумерацию винтов, трубку необходимо переместить по стрелке Б в положение II, диаметрально первому.

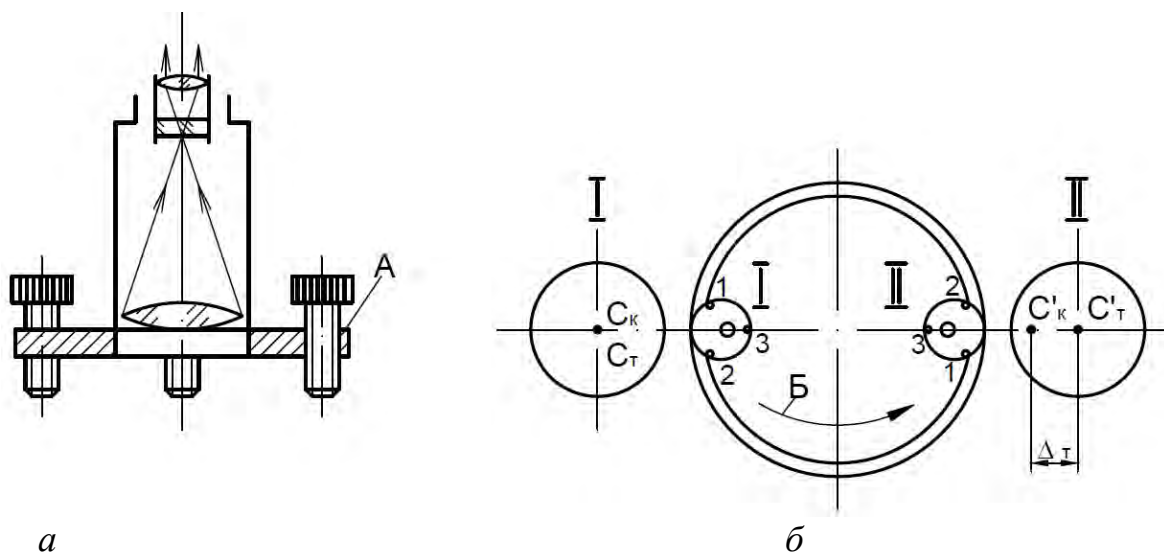


Рис. 33.6. Контроль центровки

При наличии децентрировки Δ_k сетки коллиматора лучи, выходящие из его объектива под некоторым углом и попадающие в трубку, соберутся в точку C'_k , смещенную относительно центра сетки трубки на величину Δ_T (рис. 33.6, б). Величина Δ_k определяется по формуле

$$\Delta_k = \Delta_T \frac{f'_k}{2f'_T}$$

Исправление децентрировки коллиматора выполняется методом половинных поправок: половина децентрировки устраняется при помощи наклона трубки винтами, другая половина – смещением самой сетки коллиматора. Добившись таким образом, чтобы Δ_T стала равна нулю, необходимо снова установить трубку в первое положение и повторить исправление децентрировки вышеуказанным образом, поступая так до тех пор, пока в любом положении трубки не будет наблюдаться смещение перекрестий C_T и C'_k .

33.4. Широкоугольный коллиматор

Широкоугольный коллиматор (рис. 33.7) представляет собой конусообразный корпус 3, несущий объектив 4, в фокальной плоскости которого в поворотной оправе расположена стеклянная сетка 2, как правило, с угломерной и линейной шкалами. Для получения равномерного освещения шкал перед сеткой 2 устанавливается матовое стекло 1. Объектив 4 коллиматора имеет относительное отверстие 1:4...1:5 и большой угол поля зрения $2\omega = 50\text{--}60^\circ$.

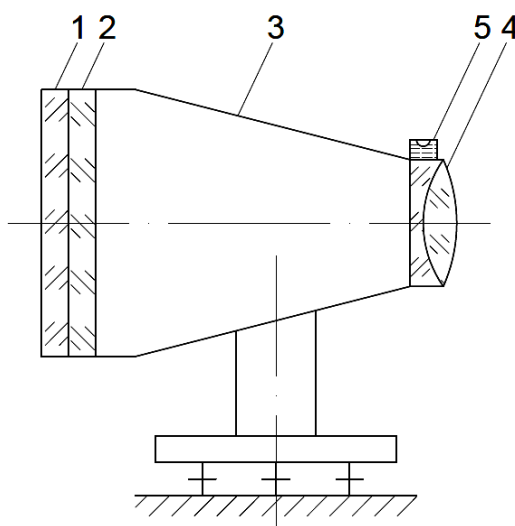


Рис. 33.7. Широкоугольный коллиматор

Коллиматор устанавливается на подставке, снабженной тремя регулировочными винтами. Для установки визирной оси коллиматора в горизонтальной плоскости на оправе объектива помещается уровень 5.

Существенное значение для широкоугольного коллиматора имеет наклон сетки 2. При наклоне сетки шкала или перекрестие, нанесенные на ней, на краях поля будут видны нерезко.

Для широкоугольных коллиматоров следует проверять и поле зрения. Объектив коллиматора контролируется на натяжение при помощи поляризационных приборов и на качество изображения (по миру и точке) по всему полю. Поле должно быть плоским.

33.5. Автоколлиматоры

Если коллиматор снабжен автоколлимационным окуляром для освещения тест-объекта и наблюдения его автоколлимационного изображения в плоскости расположения самого светящегося тест-объекта, то получается контрольно-юстировочный прибор – *автоколлиматор*.

Автоколлиматор имеет чувствительность, повышенную в два раза по сравнению с другими измерительными приборами, так как в нем повороту зеркала на угол α соответствует отклонение отраженного от него луча относительно своего первоначального направления на угол 2α или смещение автоколлимационного изображения сетки в плоскости самой сетки на величину

$$z = 2f'_{об}\alpha.$$

Выбирая объектив автоколлиматора с большим фокусным расстоянием, можно получить значительное смещение изображения тест-объекта от незначительного поворота зеркала.

В автоколлиматорах наиболее часто используются автоколлимационные окуляры Гаусса (простой и сложный), а также с призмой-кубом и двумя сетками.

В *простом* автоколлимационном окуляре Гаусса (рис. 33.8, а) между сеткой 1 и окуляром 5 установлена полупрозрачная пластинка 2. Лучи от источника 4 проходят конденсор 3 и, отразившись от пластинки 2, освещают сетку 1. Пластинка 2 установлена под углом 45° и занимает много места, поэтому окуляр должен быть длиннофокусным, из-за чего его конструкция не позволяет получить большое увеличение. Указанный недостаток устранен в *сложном* окуляре Гаусса (рис. 33.8, б), в котором введена дополнительная оптическая система 2 с увеличением 1^x . Эта система проецирует изображение сетки 1 в фокальную плоскость F окуляра б. Следовательно, окуляр может быть короткофокусным и увеличение

$$\Gamma = 250/f'_{ок}$$

будет большим. Светопропускание окуляра Гаусса – до 20 %.

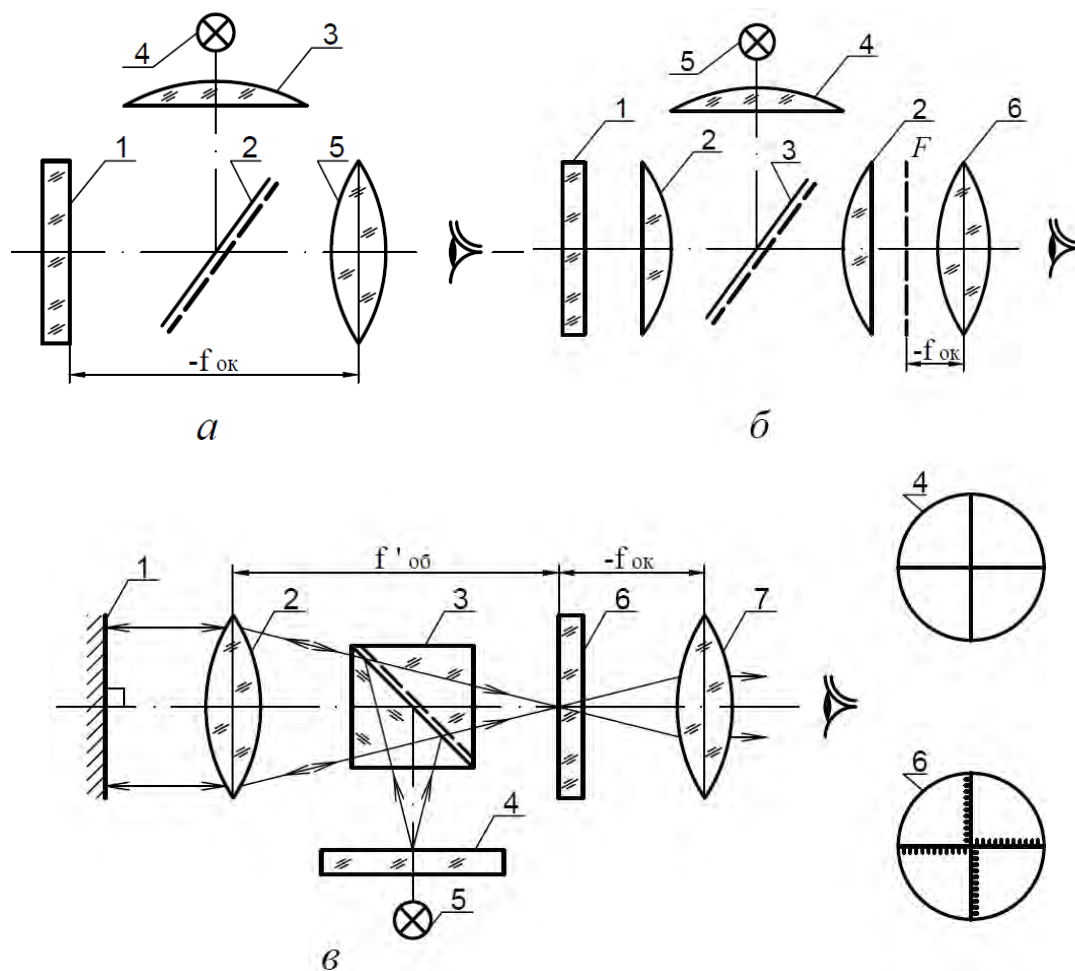


Рис. 33.8. Схемы автоколлимационных окуляров

Использование окуляра «куб с двумя сетками» в схеме автоколлимационной трубы приведено на рис. 33.8, в. Лучи от источника 5 освещают темнопольную сетку 4, которая представляет собой прозрачное перекрестие на непрозрачном фоне. Через перекрестие лучи попадают на призму-куб 3 и после отражения от зеркала 1 в плоскости сетки б образуют автоколлимационное изображение сетки 4. По шкале сетки б можно отсчитать положение автоколлимационного изображения перекрестия сетки 4. Сетки 4 и б расположены в фокальной плоскости объектива 2. В этой схеме можно применять короткофокусные окуляры, что обеспечивает достаточно большое увеличение автоколлимационной трубы. Светопропускание данной трубы – до 10 %.

Для юстировки автоколлиматоров с любыми окулярами удобнее всего использовать длиннофокусный коллиматор. В этом случае автоколлиматор своим объективом устанавливается перед объективом коллиматора. Оси труб должны быть параллельны. Наблюдение ведется со стороны тест-объекта коллиматора через отдельный окуляр. При включенной подсветке автоколлимационного окуляра в плоскости тест-объекта коллиматора должно быть резко видно изображение сетки автоколлиматора (в случае автоколлимационного окуляра с кубом-призмой и двумя сетками резко

должны быть видны обе сетки, для чего необходима дополнительная подсветка со стороны окуляра). Если резкость неудовлетворительна, то сетку (сетки) автоколлиматора перемещают вдоль оси. По этой же схеме центрируют автоколлиматор.

33.6. Динаметры

Существуют динаметры Рамсдена и Чапского. Они служат для измерения диаметра и удаления выходного зрачка телескопических, проекционных и бинокулярных систем. Эти измерения важны, так как квадрат диаметра выходного зрачка характеризует светосилу телескопической системы, а измерение удаления выходного зрачка у проекционных систем важно для правильного расположения зрачка глаза, при котором исключается срезание краев поля зрения. Измерение диаметров выходных зрачков у бинокулярных приборов позволяет судить о равенстве увеличения обеих трубок.

Динаметр Рамсдена состоит из трех трубок, входящих одна в другую без люфта (рис. 33.9). Во внутренней трубке 3 находится ахроматическая лупа 5 увеличением $10-15^x$. Для фокусировки по глазу на резкое видение делений шкалы 4 внутренняя трубка 3 может передвигаться в средней трубке 2. Для измерения диаметра выходного зрачка динаметр торцом внешней трубки 1 прикладывается к оправе окуляра испытуемой трубки и продольным перемещением трубки 2 совместно с трубкой 3 настраивается на резкое видение краев измеряемого выходного зрачка, диаметр которого определяется по шкале сетки 4.

Удаление выходного зрачка от последней поверхности линзы окуляра испытуемой трубы получается как разность отсчетов по внешней шкале 6 при наведении динаметра на резкое видение краев выходного зрачка и последней поверхности окуляра.

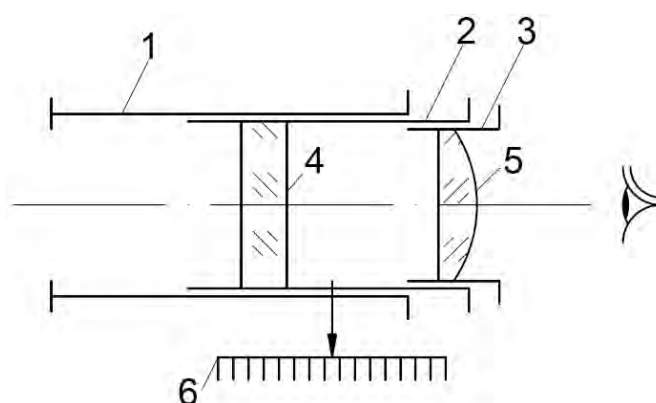


Рис. 33.9. Динаметр Рамсдена

Динаметр Чапского применяется для измерения диаметра и удаления выходного зрачка труб, у которых зрачок расположен внутри трубы (например, в трубе Галилея или фотообъективах). В этом случае с плоскостью

выходного зрчка при его измерении невозможно совместить шкалу динаметра Рамсдена. Чтобы обойти это препятствие, в динаметр Рамсдена добавляют двухлинзовый объектив 1 с увеличением 1^x , который устанавливается на двойном фокусном расстоянии от шкалы 2 (рис. 33.10).

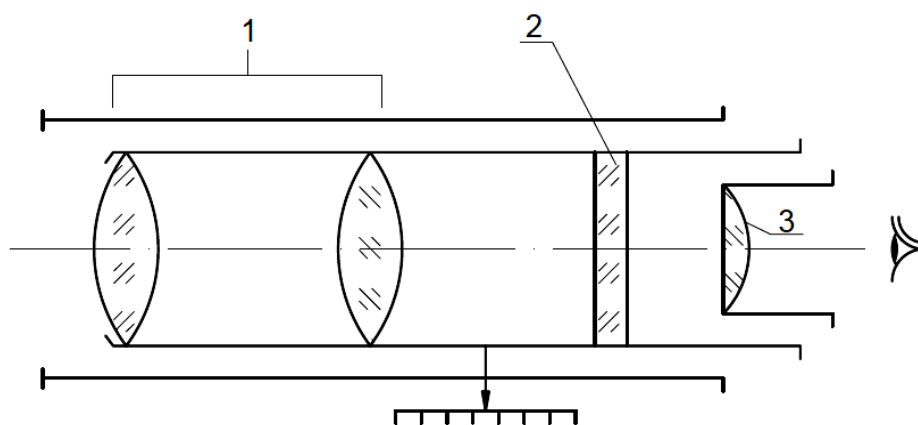


Рис. 33.10. Динаметр Чапского

33.7. Трубка Юдина, окуляр-микрометр и объект-микрометр

Трубка Юдина (рис. 33.11) предназначена для определения увеличения микроскопа и представляет собой телескопическую систему, состоящую из двух окуляров 1 и 3 типа Рамсдена равного фокусного расстояния, в фокальной плоскости которых установлена сетка 2 .

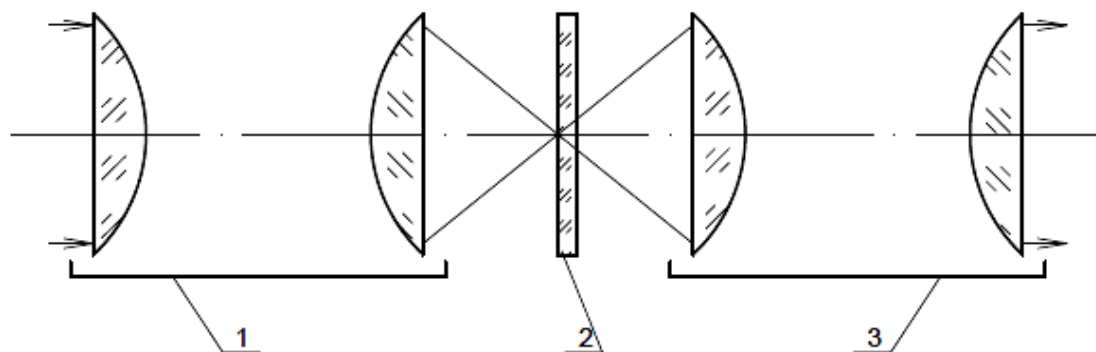


Рис. 33.11. Трубка Юдина

Окуляр 1 служит в качестве объектива, 3 – в качестве окуляра. Увеличение системы равно $(-1)^x$. При измерении окуляр 1 настраивают по глазу на резкое видение штрихов сетки 2 , после чего трубку устанавливают на окуляр микроскопа и добиваются резкого видения объекта-микрометра, находящегося на предметном столике микроскопа. Выбирают некоторый интервал y' по шкале 2 трубки Юдина и определяют укладывающийся в нем интервал y объекта-микрометра. Подставляя значения y и y' в формулу

$$\Gamma_M = \Gamma_{ок} \frac{y'}{y} = \frac{250}{f'_{ок}} \cdot \frac{y'}{y},$$

определяют увеличение микроскопа ($f'_{ок}$ – фокусное расстояние окуляра трубки Юдина).

Винтовой окулярный микрометр (рис. 33.12) представляет собой сочетание механизма микрометрической пары (винт 4 и гайка 3) с оптическим устройством (окуляр 1 и сетки 2, 6).

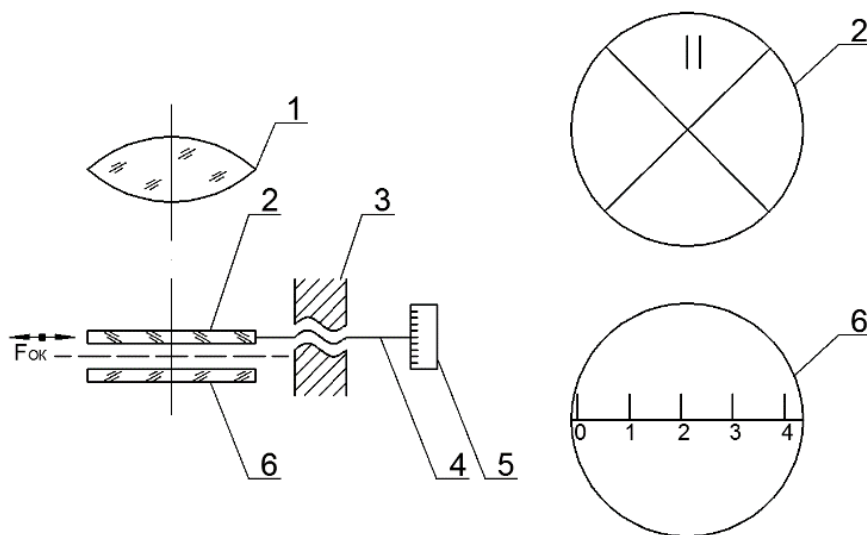


Рис. 33.12. Винтовой окулярный микрометр

Принцип работы микрометра следующий. В фокальной плоскости окуляра 1 помещены две сетки: неподвижная 6 с линейной шкалой и подвижная 2 с перекрестием и визирными штрихами. С помощью винта и гайки сетка 2 перемещается относительно сетки 6. Микрометр устанавливается на тубусе микроскопа вместо обычного окуляра так, чтобы плоскость изображения предмета, проецируемого объективом микроскопа, располагалась между сетками 2 и 6. Отсчет с помощью микрометра производится следующим образом: по неподвижной сетке 6 отсчитывается целое число миллиметров, а по барабану 5 – десятые и сотые доли миллиметра.

Объект-микрометр представляет собой металлическую или стеклянную пластинку, на которой с высокой точностью нанесена линейная шкала с ценой деления 0,01 мм, и применяется для измерения увеличения объектива микроскопа, цены деления шкал и т. п.

Глава 34. ПАРАМЕТРЫ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И МЕТОДЫ ИХ КОНТРОЛЯ

34.1. Разрешающая способность фотографического объектива

Качество фотографических объективов характеризуется так называемой фотографической разрешающей способностью, под которой подразумева-

ется максимальное число линий, отдельно воспроизводимых объективом на фотоматериале длиной 1 мм.

Фотографическая разрешающая способность длиннофокусных объективов ($f' \geq 150$ мм) проверяется на оптической скамье, схема которой приведена на рис. 34.1. В фокальной плоскости коллиматора 2 помещается мира 1. Испытуемый объектив 3 устанавливается так, чтобы его узловая точка совпадала с осью вращения O_1O_1' поворотного стола 5. При настройке скамьи за объективом 3 устанавливается микроскоп с матовым стеклом, причем последнее должно находиться в плоскости, в которой будет расположена пленка фотокамеры. Затем микроскоп заменяется на фотокамеру 4 и производится последовательная фотосъемка изображений мира, формируемых объективом в центре и других точках поля, определяемых техническими условиями. Для съемки точек поля испытуемый объектив 3 поворачивается вокруг оси O_1O_1' на выбранный угол β относительно оптической оси коллиматора, а фотокамера перемещается в проверяемую точку поля поперек оптической оси объектива.

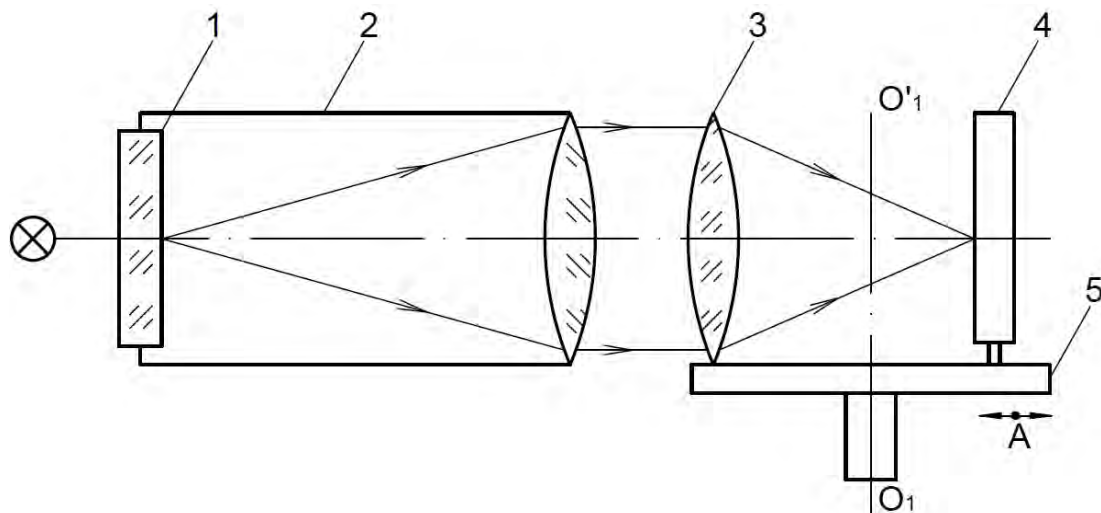


Рис. 34.1. Оптическая скамья для проверки разрешающей способности длиннофокусных объективов

Для получения более подробных сведений о разрешающей способности объектива фотосъемку производят в плоскостях, параллельных первоначально выбранной (микроскопом по матовому стеклу), смещая фотокамеру вправо и влево вдоль оптической оси объектива по стрелке А. При этом после каждого смещения фотокамеры 4 производится съемка точек поля объектива (разрешающей способности по полю). Величина смещения фотокамеры 4 и число смежных плоскостей, в которых проводится проверка, определяются техническими условиями на объектив. Полученные таким образом данные заносятся в таблицу, по которой можно выбрать плоскость с наилучшим распределением разрешающей способности.

При испытаниях длиннофокусных объективов по штриховой mire разрешающая способность в центре поля фотографического объектива определяется по формуле

$$R_N = \frac{f'_k}{f'_{об} 2a},$$

где f'_k и $f'_{об}$ – фокусные расстояния коллиматора и испытуемого объектива;
 a – ширина штриха разрешаемого элемента mire.

На угле β поля разрешающая способность объектива определяется для трех направлений штрихов mire: горизонтального R_{N_r} , вертикального R_{N_b} и наклонного под углом 45° R_{N_n} . Формулы расчета разрешающей способности для этих направлений следующие:

$$R_{N_r} = \frac{f'_k}{f'_{об} 2a_1} \cos \beta;$$

$$R_{N_b} = \frac{f'_k}{f'_{об} 2a_2} \cos^2 \beta;$$

$$R_{N_n} = \frac{f'_k}{f'_{об} 2a_3} 0,707 \cos \beta \sqrt{1 + \cos^2 \beta},$$

где a_1, a_2, a_3 – ширина штриха на mire для предельно разрешаемого элемента данного направления штрихов;

$\cos \beta$ и $\cos^2 \beta$ – коэффициенты, учитывающие искажение изображения mire, обусловленное непараллельностью плоскостей mire коллиматора и пленки при повороте объектива относительно коллиматора на угол β .

Для короткофокусных объективов за бесконечность можно принять расстояние в 30–50 фокусных его расстояний, поэтому такие объективы можно проверять с конечного расстояния на щитовой установке, схема которой приведена на рис. 34.2. Испытуемый объектив 2 вместе с фотокамерой 3 (фотоаппарат) устанавливается перед щитом 1, по полю которого расположены mire. В центре щита устанавливается «глубинная» мира А. Она состоит из центральной mire, расположенной в плоскости щита, и таких же мир, расположенных за и перед плоскостью щита. Расстояние последних от центральной mire должно соответствовать смещению изображения на величину в 0,01–0,02 мм по оптической оси испытуемого объектива 2. При расфигуровке «глубинной» mire судят о правильности фокусировки объектива на плоскость щита.

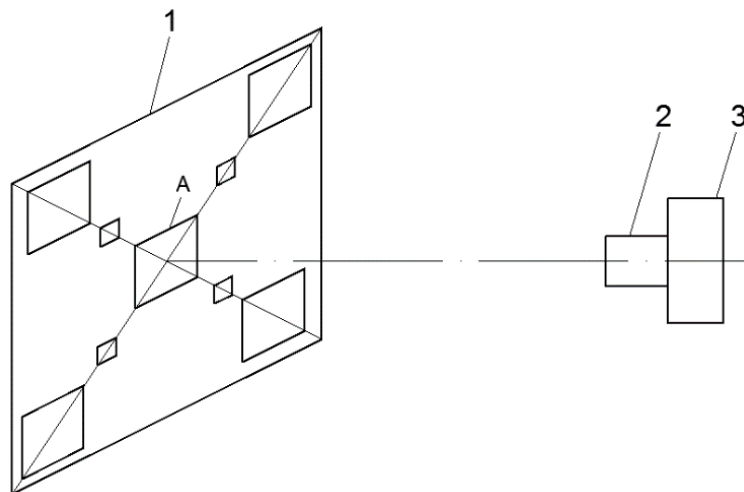


Рис. 34.2. Схема щитовой установки

На щитовой установке можно за одно срабатывание затвора фотокамеры проверить разрешающую способность объектива сразу по всему его полю.

34.2. Разрешающая способность микрообъектива

Разрешающая способность микрообъектива определяется минимальным расстоянием d между двумя светящимися точками предмета, отдельно видимыми в микроскоп. Теоретическое значение d рассчитывается по формуле

$$d = \lambda / 2A,$$

где λ — длина волны монохроматического излучения, в котором проводится наблюдение;

$A = n \sin \sigma_A$ — числовая апертура (n — показатель преломления среды, в которую помещается объект, σ_A — апертурный угол).

Разрешающая способность микрообъектива проверяется по штриховым пластинкам, имеющим расстояние между штрихами 0,2–3 мкм.

Для определения разрешающей способности микрообъектива его закрепляют в микроскоп, на предметный столик устанавливают тест-объект (штриховую пластинку) и определяют наименьшее расстояние между штрихами, еще видимыми отдельно.

Правильно изготовленная система микроскопа почти автоматически обеспечивает высокий предел разрешения, близкий к теоретическому. Поэтому в практике контроля микроскопов предел их разрешения проверяется не всегда; обычно ограничиваются проверкой только качества изображения.

34.3. Качество изображения оптических систем и его контроль

В общем случае под *качеством изображения* принято понимать способность оптической системы создавать геометрически подобные предмету изображения, в которых детали предмета и их контраст воспроизведены с достаточной точностью. Изображение предмета должно быть неискаженным по форме, неокрашенным и резким в пределах всего поля. Качество изображения зависит от наличия в системе остаточных aberrаций, дифракции, яркости и контраста предметов, дефектов в стекле, ошибок изготовления и сборки, а также от свойств приемника излучения.

34.3.1. Контроль качества изображения по «дифракционной точке»

Метод основан на изучении распределения освещенности в дифракционном изображении испытуемым объективом бесконечно удаленной светящейся точки. По дифракционной картине изображения точки (функции рассеяния) можно установить наличие остаточных aberrаций.

Дифракционное изображение точки, даваемое объективом высокого качества, имеет резко очерченный яркий центральный кружок и одно или два слабо освещенных кольца, чередующихся с темными концентрическими кольцами (рис. 34.3, *а*). Несимметрия в распределении освещенности колец указывает на наличие децентрировки линз объектива. При грубой децентрировке точка превращается в несимметричную фигуру, называемую комой (рис. 34.3, *б*). Увеличенное число колец вокруг центрального пятна (рис. 34.3, *в*) указывает на повышенную сферическую aberrацию, вызываемую погрешностью выполнения толщин линз и воздушных промежутков объектива или большим отклонением радиусов поверхностей линз от номинальных значений. Наличие астигматизма дает овальное пятно (рис. 34.3, *г*). Причиной астигматизма является искажение поверхности линзы в одном направлении, вызванное ее деформацией при сборке (завальцовке) или изготовлении.

При наличии в стекле дефектов (свилы, камни) и при пережатии линз в оправе получаются картины, приведенные соответственно на рис. 34.3, *д* и *е*. Разрыв первого дифракционного кольца (рис. 34.3, *ж*) означает, что одна из линз по краю имеет местный «завал» (сорван край). Окраска изображения указывает на наличие хроматической aberrации.

Дефектная линза в сборке обнаруживается при повороте линз в оправе вокруг оптической оси. Если дефект в изображении точки перемещается на такой же угол, что и поворачиваемая линза, то он принадлежит данной линзе.

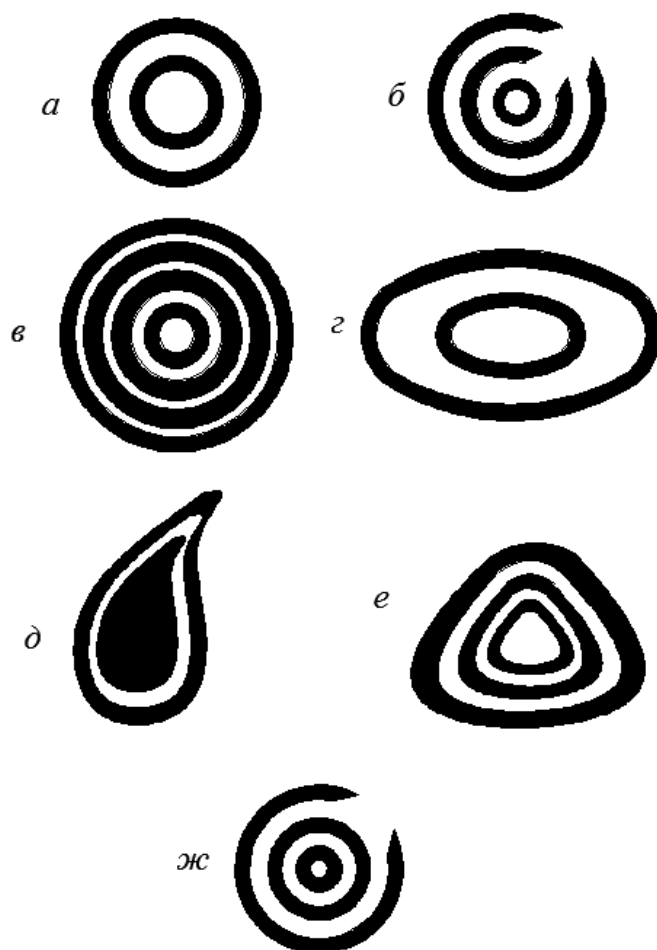


Рис. 34.3. Дифракционные изображения точки

34.3.2. Контроль качества изображения с помощью штриховой миры

В результате тщательного визуального рассмотрения изображения штрихов миры можно выявить и оценить остаточные aberrации системы. Присутствие сферической aberrации характеризуется наличием фона в виде слабого рассеянного по всему полю света. Хроматическая aberrация вызывает цветную окраску штрихов, особенно у краев изображения.

При наличии астигматизма резко видны только штрихи одного направления, например, горизонтальные. Для того чтобы резко увидеть штрихи другого направления, необходима некоторая перефокусировка оптической системы. Наличие «хвостов» в изображении линий миры указывает на наличие aberrации комы. Дисторсия дает общее подушкообразное или бочкообразное изображение квадрата миры, особенно заметное по контурам. Двоение изображения получается из-за некачественной сборки и плохой центрировки объектива, а при проверке крышеобразных призм – из-за ошибки угла крыши.

Схема установки для контроля качества изображения, формируемого объективами, такая же, как и для контроля разрешающей способности объективов.

34.4. Определение фотометрических характеристик оптических приборов

34.4.1. Измерение коэффициента светопропускания

Коэффициентом светопропускания τ оптического прибора называется отношение светового потока Φ_τ , выходящего из прибора и образующего изображение предмета, к световому потоку Φ_0 от этого предмета, который входит в испытываемую систему:

$$\tau = \Phi_\tau / \Phi_0.$$

Схема установки для измерения коэффициента полезного светопропускания телескопических систем представлена на рис. 34.4. В испытываемый прибор 5 направляется пучок лучей из коллиматора 3, в фокальной плоскости которого находится точечная диафрагма 2, подсвечиваемая источником 1. Пучок лучей после коллиматора ограничивается диафрагмой 4 до размера входного отверстия системы 5.

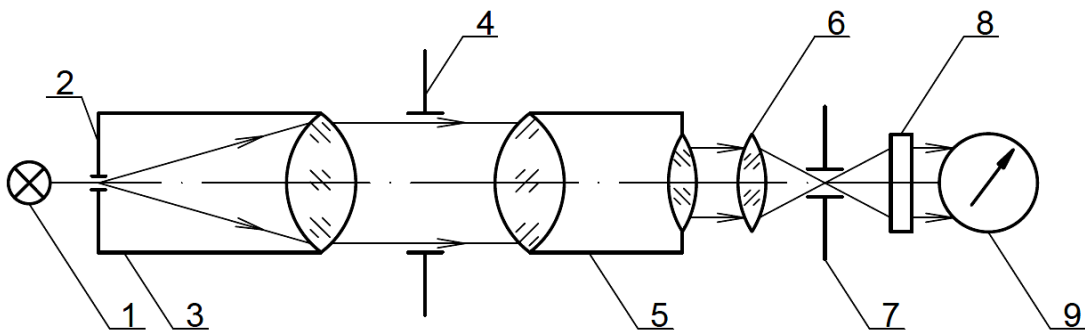


Рис. 34.4. Схема установки для измерения коэффициента светопропускания

За исследуемой системой 5 путем продольного перемещения окуляра прибора или фокусирующей линзы 6 получают изображение отверстия диафрагмы 2 и concentрично с ним устанавливают диафрагму 7. Диаметр последней выбирают таким образом, чтобы через нее проходил световой поток, формирующий изображение точечного отверстия. Поток, рассеянный прибором 5 и образующий светлый фон вокруг изображения точки, должен быть задержан.

Световой поток Φ_τ , прошедший через испытываемую систему 5 и отверстие диафрагмы 7, принимается светочувствительным приемником 8, фототок которого регистрируется гальванометром 9 (отсчет N_1). Затем фотоприемник 8 устанавливают перед объективом контролируемой системы и по шкале гальванометра снимают второй отсчет N_2 , который пропорционален световому потоку Φ_0 .

Тогда коэффициент светопропускания будет

$$\tau = \Phi_{\tau} / \Phi_0 = N_1 / N_2.$$

34.4.2. Измерение коэффициента светорассеяния

Коэффициентом светорассеяния σ оптического прибора называется отношение освещенности E_1 изображения черного предмета рассеянным излучением (фоном), созданным испытуемой оптической системой, к освещенности E_2 изображения фона (рассеянного излучения):

$$\sigma = E_1 / E_2.$$

Измерение σ осуществляется на установке с шаровым коллиматором (рис. 34.5).

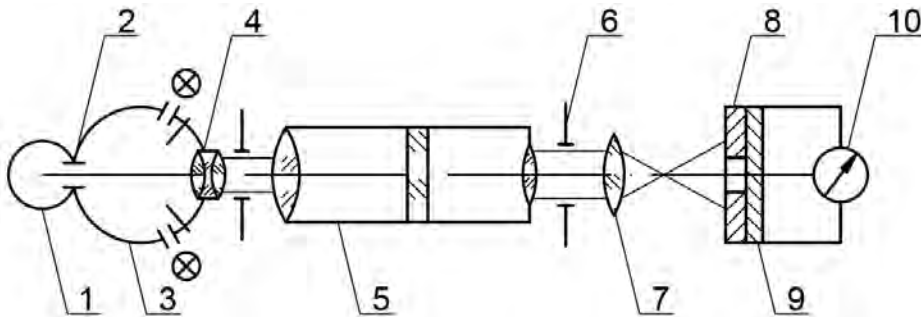


Рис. 34.5. Схема установки для измерения коэффициента светорассеяния

Испытуемая система 5 устанавливается близко к объективу 4 коллиматора. За окуляром в плоскости выходного зрачка трубы 5 установлена диафрагма 6, а за ней расположена фокусирующая линза 7. С помощью диафрагмы 8 регулируется диаметр рабочей поверхности фотоэлемента 9, соединенного с гальванометром 10. Внутренняя поверхность шара 3 окрашена белой краской и ярко освещена. Шар 3 имеет два отверстия, в одном из которых установлен коллиматорный объектив 4, а в другом – диафрагма 2 и съемная светоловушка 1, внутренние стенки которой окрашены черной матовой эмалью. Отверстие 2 вместе со светоловушкой 1 имитирует черный предмет (черное тело). Рассеянный свет, образованный в системе 5, накладывается на изображение черного предмета, поэтому оно не черное, а несколько осветленное. Отсчет N_1 на шкале гальванометра будет пропорционален освещенности E_1 изображения черного предмета рассеянным светом. Затем отверстие в задней стенке шара закрывается пробкой, окрашенной той же белой краской, что и внутренняя поверхность шара. После этого второй отсчет N_2 снимают по гальванометру, который будет пропорционален освещенности E_2 изображения стенок шара. Коэффициент светорассеяния σ вычисляется по формуле

$$\sigma = E_1 / E_2 = N_1 / N_2.$$

34.5. Измерение цветности объективов

Под **цветностью** понимается свойство объектива изменять координаты цвета прошедшего через него излучения.

Определение цветности основано на измерении отклонения координат цвета излучения стандартного источника типа А после прохождения излучения через испытуемый объектив.

Измерение координат цвета производится на установке, схема которой приведена на рис. 34.6.

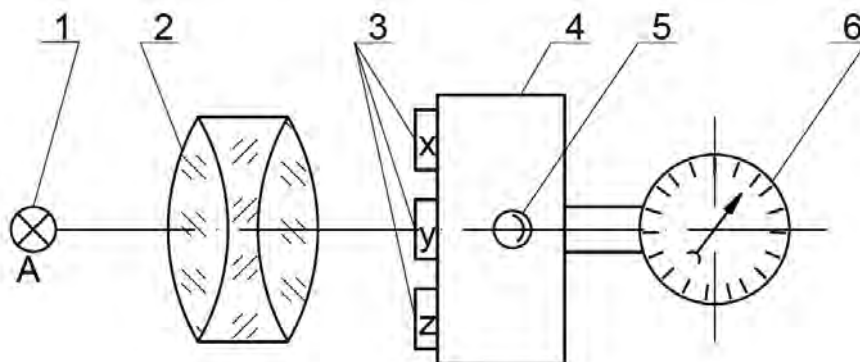


Рис. 34.6. Схема установки для измерения координат цвета:
 1 – стандартный источник света типа А; 2 – испытуемый объектив;
 3 – сменные светофильтры; 4 – фотоэлектрический колориметр;
 5 – фотоприемник; 6 – измерительный прибор

Порядок измерения цветности объективов следующий. Перед фотоприемником устанавливают светофильтр Y. Передвижением источника излучения и испытуемого объектива необходимо добиться такого их положения, чтобы отсчет N_2 по шкале измерительного прибора при полном заполнении входного отверстия фотоэлемента колориметра испытуемым излучением был максимальным. Перед фотоприемником поочередно устанавливают светофильтры X и Z и снимают отсчеты N_1 и N_3 . Измерения повторяют не менее трех раз при каждом светофильтре и вычисляют среднеарифметические значения N_1, N_2, N_3 . Компоненты цвета x', y', z' вычисляют по формулам

$$\left. \begin{aligned} x' &= C_x(\overline{N_1} + \Delta_1) - 0,4C_y(\overline{N_2} + \Delta_2) + 0,2C_z(\overline{N_3} + \Delta_3); \\ y' &= C_y(\overline{N_2} + \Delta_2); \\ z' &= C_z(\overline{N_3} + \Delta_3), \end{aligned} \right\}$$

где C_x, C_y, C_z – постоянные коэффициенты, вычисленные при градуировке колориметра;

$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – поправки, снятые с корректировочного графика для отсчетов N_1, N_2, N_3 соответственно.

Координаты цвета излучения, прошедшего через испытуемый объектив, определяются по формулам

$$X = \frac{x'}{x' + y' + z'};$$

$$Y = \frac{y'}{x' + y' + z'}.$$

По найденным значениям координат цвета X и Y с помощью равноконтрастного цветового графика (рис. 34.7) определяются цветовой тон излучения $\lambda_{\text{эф}}$ стандартного источника света типа А, прошедшего через испытуемый объектив, и отклонение его координат цвета в порогах L . Объектив считается удовлетворительным по цветопередаче, если отклонение координат цвета не превышает 0,5 порога при цветовом тоне $\lambda_{\text{эф}} = 573\text{--}580$ нм. (Одному порогу соответствует линейное расстояние по стандартному равноконтрастному цветовому графику около 67 мм).

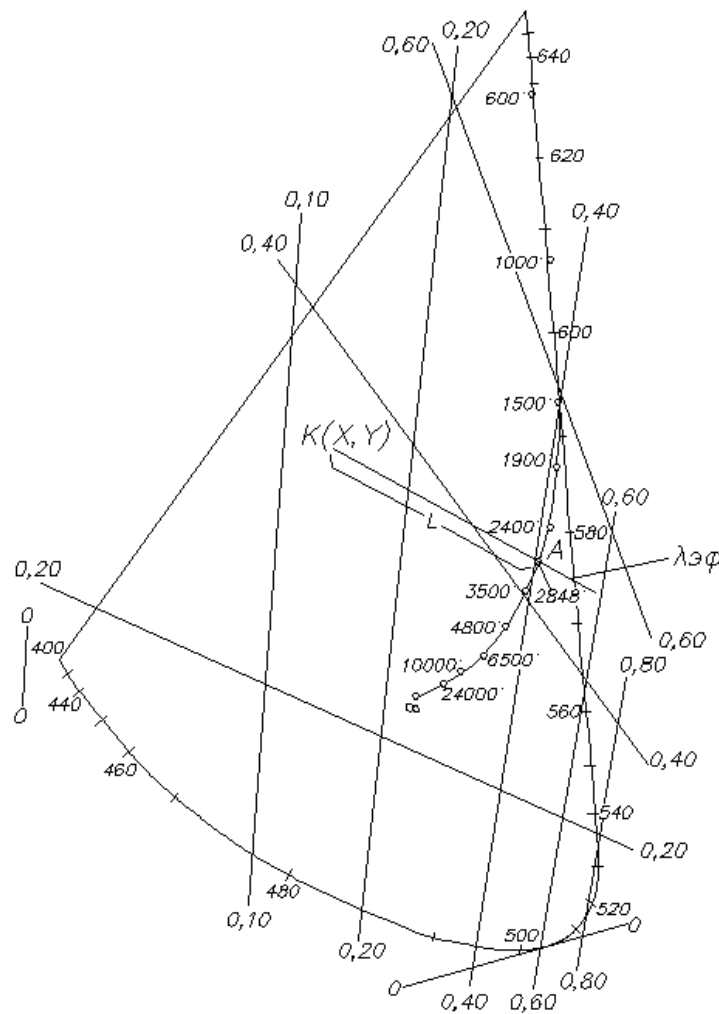


Рис. 34.7. Равноконтрастный цветовой график

Светофильтр X состоит из оптических стекол СЗС-18, СЗС-14 и ОС-5 толщиной по 2 мм.

Светофильтр Y состоит из стекла СС-5 толщиной 1,4 мм и ЗС-3 толщиной 0,9 мм.

Светофильтр Z состоит из стекол СС-8 и ЖС-11 толщиной по 2 мм и стекла СС-5 толщиной 9 мм.

34.6. Измерение угла поля зрения

Угол поля зрения прибора определяется наибольшим углом наклона пучков, которые еще проходят через его оптическую систему.

Схема измерения угла поля зрения 2ω оптического прибора при помощи широкоугольного коллиматора представлена на рис. 34.8.

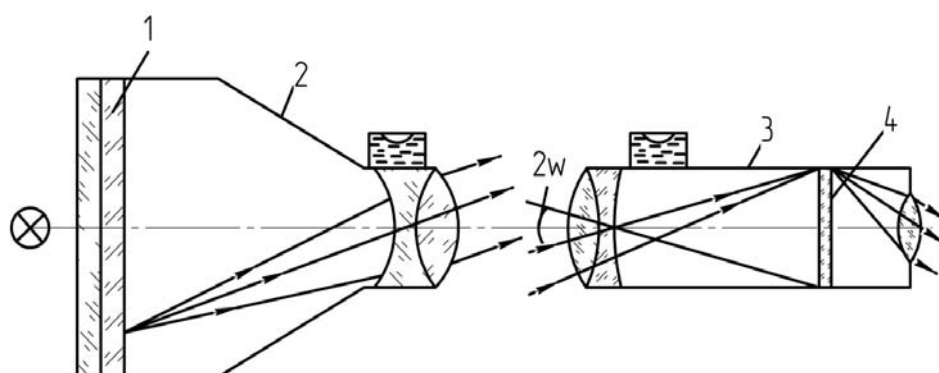


Рис. 34.8. Схема установки для измерения угла поля зрения

Перед объективом широкоугольного коллиматора 2 устанавливают испытуемый прибор 3 и добиваются совмещения сеток 1 и 4 (шкала сетки 1 широкоугольного коллиматора проградуирована в градусах, минутах и секундах). Наблюдая через окуляр испытуемого прибора 3, делают по два отсчета в горизонтальном и вертикальном направлениях от нулевого штриха шкалы 1 широкоугольного коллиматора до ее крайних делений, ограничиваемых полевой диафрагмой (оправой сетки 4) проверяемого прибора. Сумма отсчетов по каждому из двух направлений шкалы коллиматора определяет действительное поле зрения прибора.

Одновременно с измерением угла поля зрения можно измерить эксцентриситет сетки 4, т. е. определить величину смещения ее центра относительно центра поля зрения. Величина эксцентриситета сетки выражается полуразностью двух отсчетов: от центра шкалы коллиматора до края поля зрения влево и вправо (или до края вверх и вниз) при совмещенных сетках проверяемого прибора и коллиматора. Эксцентриситет определяют по формуле

$$e = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2},$$

где ω_1 и ω_2 – отсчеты углов по сетке коллиматора, соответствующие краям поля зрения прибора.

34.7. Контроль и юстировка визирной линии в телескопических системах

Прямую, соединяющую центр сетки прибора с задней узловой точкой его объектива называют визирной линией или осью прибора.

Под визированием или наводкой подразумевают приведение прибора в такое положение, при котором его визирная линия проходит через наблюдаемый предмет.

На положение визирной линии прибора могут оказывать влияние следующие факторы:

1. Неточность изготовления некоторых оптических деталей. Так, например, установленное перед объективом прибора клиновидное защитное стекло смещает изображение визируемой точки, расположенной на оси, относительно центра сетки на величину

$$\Delta = f'_{об} (n - 1) \sigma,$$

где σ – величина преломляющего угла клина защитного стекла (рис. 34.9).

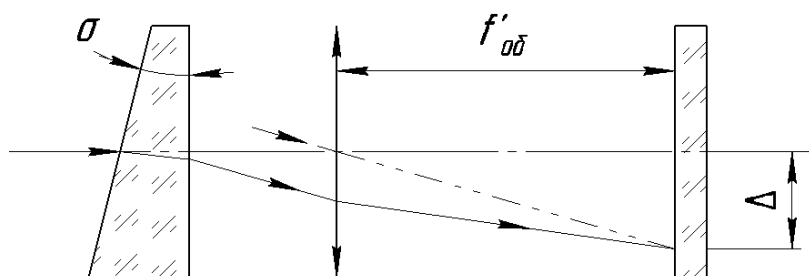


Рис. 34.9. Смещение луча клиновидным защитным стеклом

2. Наклоны и смещения зеркал, установленных между объективом 1 и сеткой 3 (рис. 34.10).

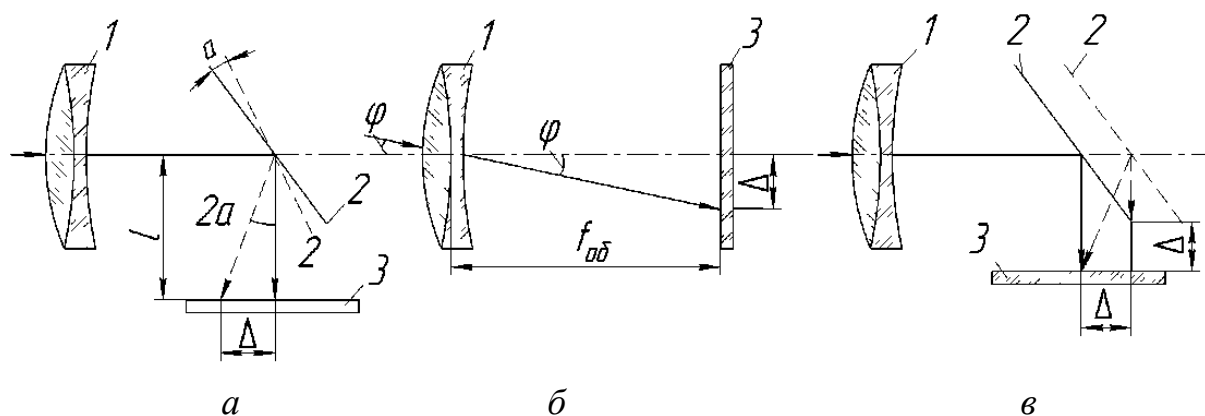


Рис. 34.10. Смещение луча зеркалом

Из рис. 34.10, а следует, что поворот зеркала 2 на угол α приводит к смещению луча в плоскости сетки 3 на величину

$$\Delta = l2\alpha,$$

где l – расстояние от оси объектива до сетки 3.

При этом, как видно из выпрямленной схемы (рис. 34.10, б), происходит наклон визирной оси на угол

$$\varphi = \frac{\Delta}{f'_{об}}$$

Поступательное перемещение зеркала 2 по горизонтали в положение 2' (рис. 34.10, в) на величину Δ приводит к изменению направления визирной линии также на угол $\varphi = \Delta / f'_{об}$ и вызывает, кроме того, децентрировку и параллактическое смещение изображения бесконечно удаленного предмета относительно сетки на величину Δ .

3. Смещение линз оборачивающих систем (рис. 34.11).

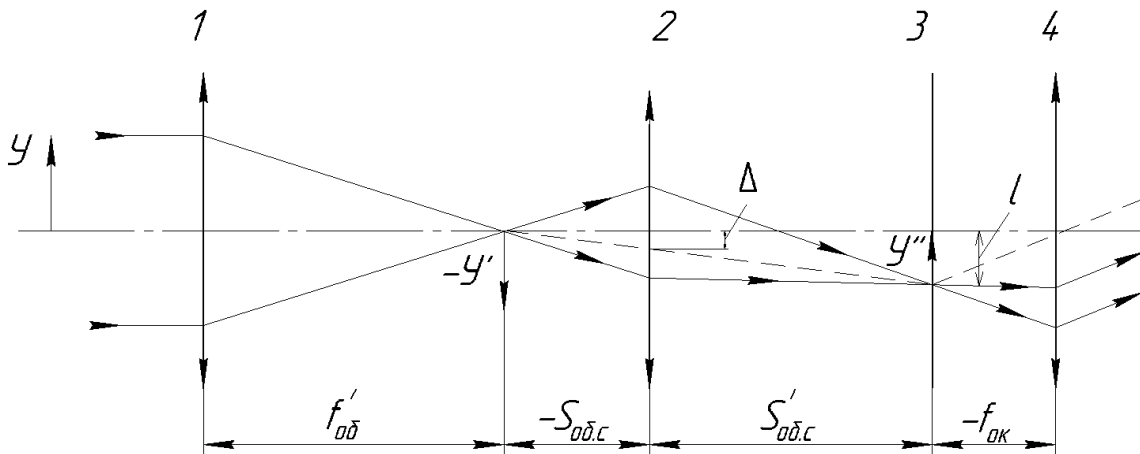


Рис. 34.11. Оптическая схема оборачивающей системы

Смещение линзовой оборачивающей системы 2 перпендикулярно оптической оси объектива 1 прибора на величину Δ вызывает смещение луча в плоскости сетки 3 на величину l , которая наблюдается через окуляр 4 и, как видно из рис. 34.11, будет

$$l = -\frac{\Delta(-S_{об.с} + S'_{об.с})}{S_{об.с}}$$

Контроль и юстировку ориентации визирных линий осуществляют при помощи контрольно-юстировочного прибора, включающего в себя коллиматор 2 (рис. 34.12) и кронштейн 3 для установки испытуемого прибора.

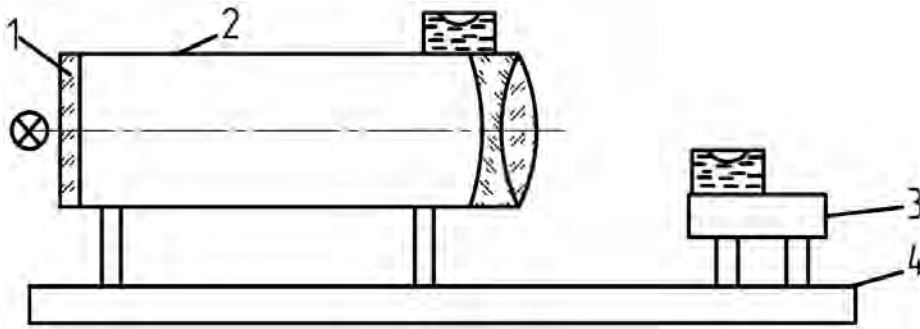


Рис. 34.12. Схема контрольно-юстировочного прибора для контроля ориентации визирной оси

Коллиматор и кронштейн жестко закрепляют на плите 4 и выставляют их относительно друг друга.

Испытуемый прибор устанавливают базовой поверхностью на посадочную поверхность кронштейна 3 и, наблюдая в окуляр прибора, определяют положение его сетки относительно изображения сетки 1 коллиматора 2.

Ошибку положения визирной линии контролируемого прибора относительно его конструктивных элементов исправляют различными методами. В телескопических приборах эти ошибки устраняют центрированием оптической системы путем перемещения оптических деталей (объектива, сеток, призм и т. д.) перпендикулярно их оси.

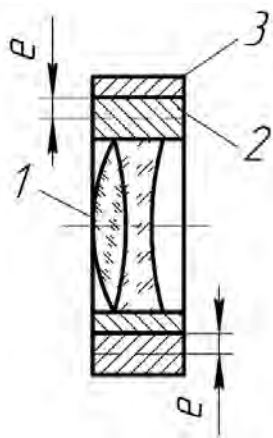


Рис. 34.13. Эксцентриковая оправка объектива

Для юстировки визирной линии в некоторых приборах применяют эксцентриковые оправы и кольца. Как видно из рис. 34.13, при встречном вращении эксцентриковой (разнотолщинной) оправы 2 совместно с объективом 1 и эксцентрикового кольца 3 оптическая ось объектива будет перемещаться по кругу, радиус которого равен величине эксцентриситета оправы 2 и кольца 3.

Максимальная величина перемещения оптической оси объектива будет равна двойной величине эксцентриситета. При этом максимальное смещение визирной линии определяется углом

$$\varphi = \frac{2e}{f'_{об}} 3438,$$

где e – величина эксцентриситета оправы 2 и кольца 3;

$f'_{об}$ – фокусное расстояние объектива.

При юстировке визирной линии прибора путем перемещения сетки используют четыре юстировочных винта, с помощью которых сетку перемещают перпендикулярно оси.

34.8. Параллакс в оптических приборах

34.8.1. Понятие о параллаксе и фокусировке

Рассмотрим зрительную трубу, оптическая схема которой приведена на рис. 34.14. Бесконечно удаленный предмет y (например, сетка коллиматора, установленного объективом к объективу 1 испытуемой зрительной трубы) изображается объективом 1 в его фокальной плоскости P (изображение y' на рис. 34.14).

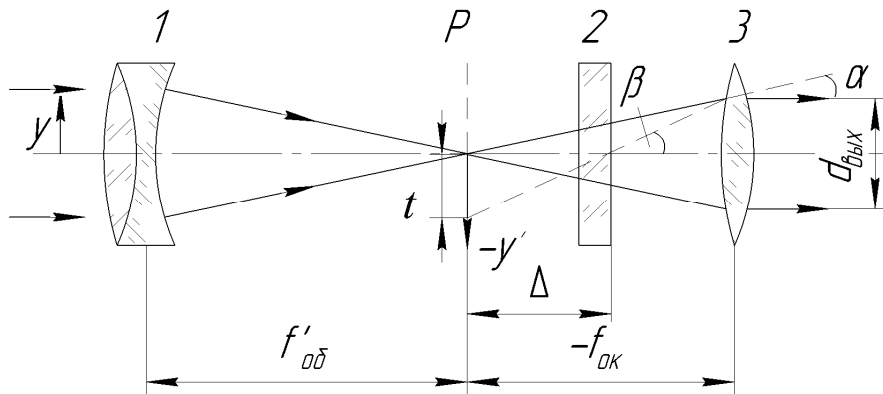


Рис. 34.14. К определению параллакса

В общем случае сетка 2 не совпадает с фокальной плоскостью P (смещена, например, в сторону окуляра на величину Δ). Это явление несовпадений двух одновременно наблюдаемых плоскостей принято называть *параллаксом*, который проявляется в трех измерениях: продольном Δ , поперечном t и углом α (см. рис. 34.14).

При поперечном смещении глаза в пределах выходного зрачка будет наблюдаться поперечное смещение сетки 2 на величину t как более близкого предмета относительно изображения y' . Это смещение принято называть *поперечным параллаксом*.

Поперечный параллакс наблюдается за окуляром под углом α , который служит мерой *углового параллакса*. Угол α образован двумя лучами, идущими от изображения y' предмета y и от неправильно установленной сетки.

Технологический прием, выполняемый в процессе сборки приборов для устранения в них параллакса, принято называть *фокусировкой*.

34.8.2. Измерение параллакса

А. Измерение параллакса диоптрийной трубкой

Перед объективом испытуемого прибора 3 (рис. 34.15) устанавливают коллиматор 2 с сеткой 1, а за окуляром прибора 3 – диоптрийную трубку 7.

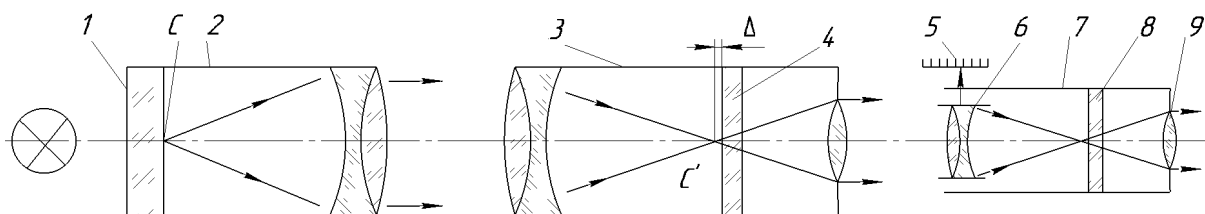


Рис. 34.15. Схема установки для измерения параллакса диоптрийной трубкой

Окуляр 9 диоптрийной трубки настраивают по глазу на резкое видение сетки 8. Перемещением объектива 6 трубки добиваются резкого видения в плоскости сетки 8 изображения сетки 1 коллиматора 2, сформированного объективом испытуемого прибора 3 в его фокальной плоскости, и по шкале 5 снимают отсчет N_1 со своим знаком. Затем вторичным перемещением объектива 6 диоптрийной трубки настраиваются на резкое изображение сетки 4 испытуемого прибора 3 в плоскости сетки 8 и по шкале 5 снимают второй отсчет N_2 со своим знаком. Разность $N = N_1 - N_2$ дает величину параллакса в диоптриях, измеренную со стороны окуляра испытуемого прибора. Значение продольного параллакса Δ рассчитывают по формуле

$$\Delta = \pm \frac{f_{\text{ок}}^2}{1000} N,$$

где $f_{\text{ок}}$ — фокусное расстояние окуляра испытуемого прибора.

Зная Δ , можно рассчитать поперечный параллакс t (см. рис. 34.14) по формуле

$$t = \Delta \operatorname{tg} \beta,$$

где $\operatorname{tg} \beta = \frac{d_{\text{вых}}}{2(f_{\text{ок}} - \Delta)}$;

$d_{\text{вых}}$ — диаметр выходного зрачка испытуемого прибора.

Б. Измерение параллакса в угловой мере

Перед объективом коллиматора помещают испытуемый прибор и, наблюдая в его окуляр, наводят на резкое видение изображения сетки коллиматора (см. рис. 34.15). Перемещая глаз от центра выходного зрачка испытуемого прибора до его края в вертикальном направлении, наблюдают смещение изображения сетки коллиматора относительно выбранного знака на сетке испытуемого прибора (например, относительно центра) и по делениям шкалы сетки коллиматора, которая проградуирована в градусах, минутах и секундах, определяют величину параллакса испытуемого прибора в угловой мере.

По направлению смещения сетки 4 испытуемого прибора (см. рис. 34.15) относительно изображения сетки коллиматора можно определить место рас-

положения сетки прибора. Так, например, если сетка испытуемого прибора смещена в сторону его объектива, т. е. находится между объективом и его фокальной плоскостью, то при поперечном движении глаза она смещается в том же направлении. Такой параллакс принято называть параллаксом «за глазом».

Если же сетка смещена от объектива и находится за его фокальной плоскостью, то при поперечном движении глаза она смещается в противоположном направлении. Такой параллакс принято называть параллаксом «против глаза».

В. Неустранимый параллакс и его компенсация

При наличии остаточных aberrаций (астигматизма, хроматической и сферической aberrаций) возникает неустранимый параллакс. Например, в процессе юстировки параллакса в приборе обнаружено, что при движении глаза вверх сетка прибора смещается вниз, т. е. наблюдается параллакс «против глаза». Однако при движении глаза вправо сетка прибора смещается также вправо, т. е. в приборе имеет место и параллакс «за глазом». Следовательно, в приборе присутствует смешанный параллакс, который указывает на плохое качество оптических элементов, расположенных до сетки, так как aberrации окуляра не влияют на параллакс.

На основе анализа качества изображения оптической системы проверяемого прибора устанавливают причину неустранимого параллакса. Такой параллакс можно компенсировать только юстировкой оптических узлов, вызывающих ухудшение качества изображения прибора.

Если после выполнения юстировочных операций устранить параллакс в приборе не удастся, то в нем заменяют соответствующие оптические узлы.

Объективы коллиматоров, предназначенных для определения параллакса в телескопических приборах, должны иметь диаметр, превышающий диаметр объективов испытуемых приборов ($D_k \geq 1,2D_{\text{исп}}$). Так как сетка в эталонном коллиматоре относительно фокальной плоскости его объектива установлена с некоторой погрешностью δ_k , то для уменьшения влияния этой погрешности на измерение параллакса фокусное расстояние эталонного коллиматора выбирают больше фокусного расстояния объектива проверяемого прибора.

Ошибку в величине параллакса испытуемого прибора $\delta_{\text{исп}}$, обусловленную погрешностью установки сетки эталонного коллиматора δ_k , можно определить по формуле

$$\delta_{\text{исп}} = \delta_k \left(\frac{f'_{\text{исп}}}{f'_k} \right)^2,$$

где f'_k и $f'_{\text{исп}}$ – фокусное расстояние объективов коллиматора и испытуемого прибора соответственно.

Глава 35. ОСНОВНЫЕ ЮСТИРОВОЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ

35.1. Операции и приемы юстировки

Процесс юстировки любого узла или прибора включает следующие операции:

контроль, т. е. выявление в результате измерения или наблюдения тех ошибок (или дефектов), которые необходимо устранить при юстировке;

собственно юстировку, т. е. устранение в наиболее целесообразной последовательности всех выявленных ошибок (и дефектов) соответствующими подвижками деталей или реже – изменением их физических свойств;

закрепление деталей в целях фиксации их правильного взаимоположения, достигнутого в результате юстировки;

контроль величины остаточных погрешностей.

При юстировке пользуются в основном двумя приемами устранения выявленных ошибок. *Первый прием* состоит в том, что каждую схемную деталь и узел устанавливают последовательно и с заданной точностью в указанное сборочным чертежом положение. Этот прием *последовательной юстировки* весьма трудоемок, требует высокой квалификации сборщика.

Более прогрессивным является *второй прием юстировки*, в котором почти все схемные детали и узлы устанавливают в заданные чертежом положения лишь приблизительно (практически без юстировки), а затем накопленная суммарная ошибка (за счет погрешностей изготовления и сборки) компенсируется заранее предусмотренными подвижками одного или двух схемных элементов. Этот прием *комплексной юстировки* позволяет существенно повысить производительность труда на сборке, упростить конструкцию приборов, однако перед инженерно-техническими работниками выдвигает дополнительные задачи, а именно, разработать методику юстировки, которая позволяла бы компенсировать все накопленные погрешности в необходимых пределах и с нужной точностью.

35.2. Стадии и задачи юстировки и методы их аналитического решения

В общем случае юстировку любого оптического прибора можно разбить на две стадии: геометрическую и специальную.

Назначением *геометрической юстировки* является установка оптических деталей и узлов в правильное взаимное положение в соответствии со схемой оптики. *Специальная юстировка* имеет целью приведение оптических деталей и узлов в такое положение, при котором изделие в целом удовлетворяет всем требованиям технических условий.

Все огромное разнообразие юстировочных задач может быть сведено к четырем основным группам:

1) фокусировка изображения, устранение параллакса шкал и сеток, регулировка масштаба изображения и увеличения оптической системы;

2) центрирование оптических деталей и узлов системы относительно заданных направлений и осей;

3) ориентирование положения изображения или траектории его перемещения в поле зрения оптических систем относительно заданных направлений или линий (устранение наклонов и уводов изображений, разворотов шкал и сеток и т. п.);

4) обеспечение качества изображения, даваемого оптической системой.

Задачи первой группы решаются в основном путем продольных подвижек деталей и узлов оптических систем, задачи второй группы – поперечными сдвигами деталей и узлов. Для решения задач третьей группы главным образом применяется поворот зеркально-призмных систем вокруг продольных осей.

Для полного решения юстировочной задачи необходимо выполнить следующее:

1. На основе изучения устройства прибора, принципа действия, его назначения, условий работы и технических требований строго сформулировать задачу юстировки, т. е. выделить те свойства и характеристики прибора, на которые могут влиять ошибки отдельных деталей и положение узлов, и установить требования к точности их взаимориентирования.

2. Рассмотреть возможные подвижки основных (влияющих на заданные свойства и характеристик узла или прибора) оптических деталей и узлов и определить масштаб их влияния на данные свойства и характеристики прибора.

3. Выбрать вид сборки, в первую очередь рассмотрев возможность сборки узла или прибора по принципу взаимозаменяемости. При неизбежности использования сборки с компенсацией наметить минимальное, но достаточное число юстировочных подвижек, желательно независимого действия.

4. Предложить способ контроля, позволяющий выявить погрешности прибора, подлежащие устранению в процессе его юстировки.

5. Разработать методику юстировки, т. е. определить инструмент или дополнительные средства и наметить последовательность выполнения юстировочных операций для достижения заданной точности.

6. Предусмотреть надежную фиксацию юстировочных деталей и узлов.

7. Предусмотреть возможность сохранения, поддержания или периодического восстановления рабочего состояния прибора в условиях эксплуатации.

35.3. Фокусировка изображения

35.3.1. Фокусировка изображения с помощью линзы

При фокусировке изображения с помощью линзы необходимо знать зависимость между ее продольным смещением и величиной возникающей при этом расфокусировки изображения. Эту зависимость можно получить

из рис. 35.1, где показан ход лучей между сопряженными точками A_0 и A'_0 для линзы в исходном положении и между точками A_0 и A' после смещения линзы на величину Δx .

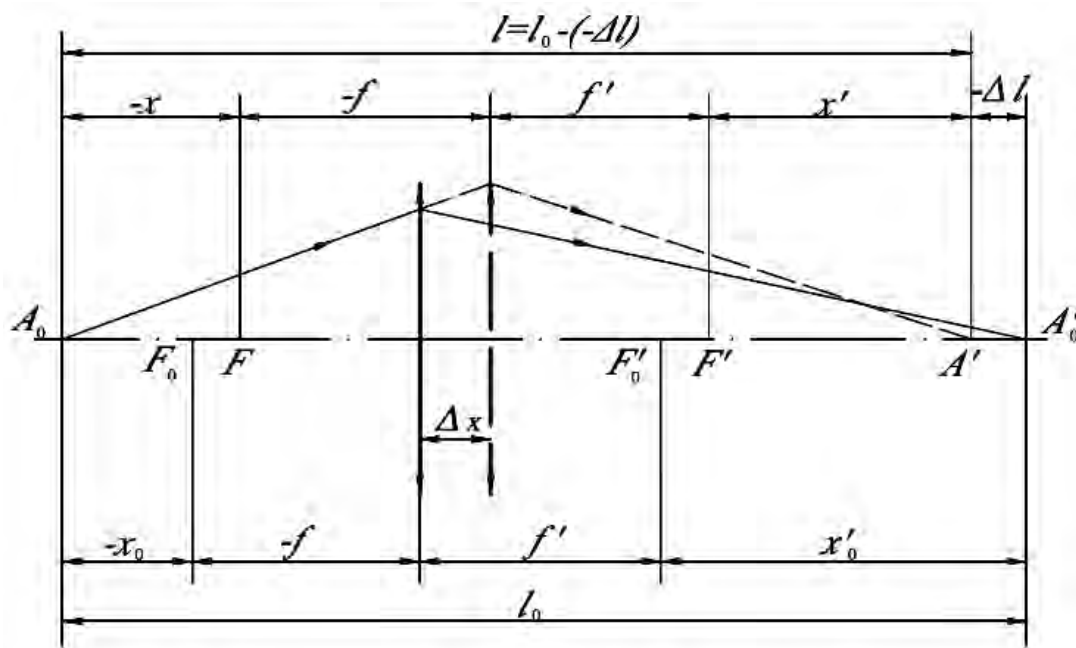


Рис. 35.1. Расчетная схема для определения зависимости между величиной смещения линзы и возникающей при этом расфокусировке

Расстояние l между сопряженными точками A_0 и A'

$$l = -X - f + f' + X'.$$

Поскольку для линзы в воздухе $-f = f'$, то, используя формулу Ньютона ($XX' = ff' = -f'^2$), можно записать

$$l = -X + 2f' - f'^2 / X. \quad (35.1)$$

Применяя выражение (35.1) для линзы в исходном и смещенном положениях, найдем соотношение для Δl :

$$\begin{aligned} \Delta l = l - l_0 &= -X + 2f' - f'^2 / X + X_0 - 2f' + f'^2 / X_0 = \\ &= -X + X_0 - \frac{f'^2 X_0 - f'^2 X}{XX_0} = X_0 - X - \frac{f'^2}{XX_0} (X_0 - X); \\ \Delta l &= (1 - f'^2 / XX_0)(X_0 - X). \end{aligned}$$

Из рис. 35.1 видно, что $X_0 - X = \Delta X$, а по формуле линейного увеличения

$$V = -f/X = -X'/f' = -f'/X = -X'/f;$$

$$f'^2 / XX_0 = V_0 V.$$

Поэтому окончательно получим

$$\Delta l = (1 - V_0 V) \Delta X. \quad (35.2)$$

Поскольку линейное увеличение V линзы, смещенной на малую величину ΔX , мало отличается от ее увеличения V_0 , т. е.

$$V = V_0 - \Delta V,$$

где ΔV – малая величина, то формулу (35.2) преобразуем к виду

$$\Delta l = (1 - V_0^2 + V_0 \Delta V) \Delta X. \quad (35.3)$$

Рассмотрим следующие частные случаи.

1. $|V_0| \ll 1$ – случай объектива зрительной трубы или фотообъектива, сфокусированных на удаленную точку ($X_0 \gg f$).

Тогда из (35.3) получаем

$$\Delta l \approx \Delta X,$$

т. е. изображение A' точки A_0 смещается совместно с линзой.

2. $|V_0| = 1$ – случай, когда точка предмета расположена на двойном фокусном расстоянии от линзы (случай оборачивающей системы однократного увеличения). При этом

$$\Delta l = V_0 \Delta V \Delta X,$$

где

$$\Delta V = V_0 - V = -f/X_0 + f/X = f \frac{X_0 - X}{X_0 X} = f \frac{\Delta X}{X_0 (X_0 - \Delta X)} \approx f \Delta X / X_0^2.$$

Тогда

$$\Delta l = V_0 f \left(\frac{\Delta X}{X_0} \right)^2 = V_0 (-V_0) \frac{(\Delta X)^2}{X_0} = -\frac{(\Delta X)^2}{X_0}.$$

Из последнего равенства видно, что при $V_0 = 1$

$$(X_0 = -f) \quad \Delta l = \Delta X^2 / f,$$

а при $V_0 = -1$

$$(X_0 = f) \quad \Delta l = -(\Delta X)^2 / f.$$

Следовательно, при малом смещении линзы в любом направлении из исходного положения, когда ее линейное увеличение $|V_0| = 1$, изображение всегда смещается в одном и том же направлении, причем для увеличения $V_0 = 1$ и $V_0 = -1$ направления смещений противоположны.

3. $|V_0| \gg 1$ – случай микрообъектива, когда точка предмета расположена слева от переднего фокуса линзы на близком расстоянии. Выражение (35.3) для определения смещения изображения принимает вид

$$\Delta l \approx -V_0^2 \Delta X,$$

т. е. изображение смещается в ускоренном масштабе в сторону, противоположную направлению смещения линзы.

4. $V_0 = \infty$ – случай, когда предмет находится в фокальной плоскости линзы, а его изображение – в бесконечности. При смещении линзы на величину ΔX , т. е. $-X = \Delta X$, из формулы Ньютона получаем, что расстояние X' до изображения предмета будет

$$X' = f^2 / \Delta X.$$

5. Если смещаемая линза расположена перед оптической системой с увеличением Γ_c , то смещение линзы на величину ΔX вызывает смещение изображения на величину

$$\Delta l_c = (1 - V_0^2 + V_0 \Delta V) \Delta X \Gamma_c.$$

35.3.2. Фокусировка изображения с помощью плоского зеркала

Для получения выражения, устанавливающего зависимость между величинами смещения зеркала и изображения, рассмотрим рис. 35.2. Луч A , падающий под углом α , является центральным (главным) лучом светового пучка, который дает изображение точки C предмета. Построив отраженный луч от плоского зеркала, находящегося в положении K_1 , получим изображение в точке C_0 , которая находится в плоскости сетки.

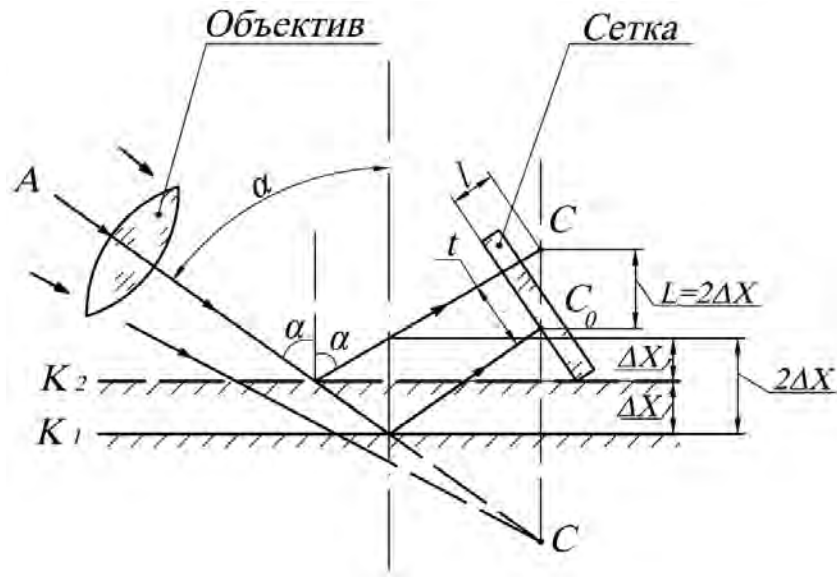


Рис. 35.2. Фокусировка изображения с помощью плоского зеркала

После смещения зеркала вдоль нормали на величину ΔX оно займет положение K_2 , а изображение получим в точке C' .

Поскольку изображение точки C' по отношению к плоскости сетки смещено наклонно, то возникают как поперечный сдвиг (децентрировка) изображения в плоскости сетки

$$t = 2\Delta X \sin \alpha,$$

так и продольное смещение (расфокусировка)

$$l = 2\Delta X \cos \alpha.$$

Таким образом, влияние смещения плоского зеркала зависит от угла падения α луча: с увеличением угла α возрастает величина поперечного сдвига t изображения в плоскости сетки и уменьшается величина расфокусировки l .

35.3.3. Фокусировка изображения с помощью системы из двух плоских зеркал

Из треугольников O_1MO_2 и O_1BO_2 на рис. 35.3 видно, что

$$\alpha = \varepsilon_1 + \varepsilon_2,$$

а

$$\omega = 2\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 = 2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = 2\alpha.$$

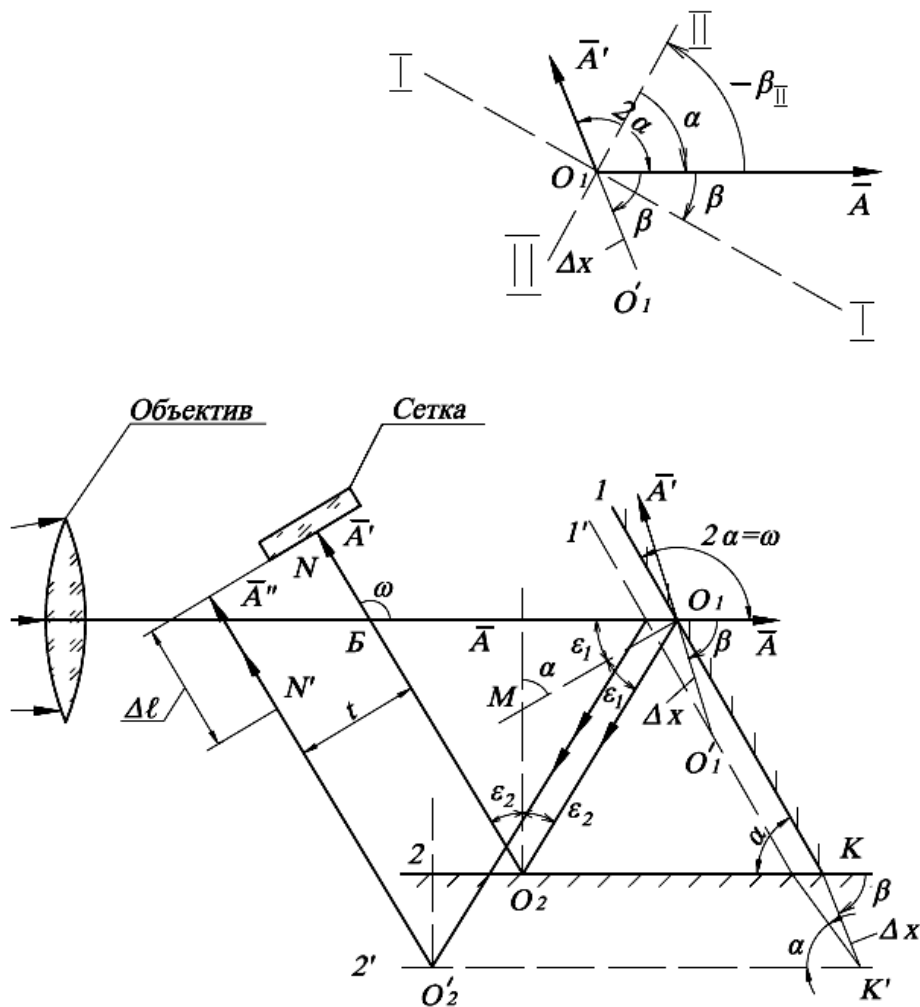


Рис. 35.3. Фокусировка изображения с помощью системы из двух плоских зеркал

Смещение системы из двух плоских зеркал на величину ΔX под углом β к направлению падающего луча (орт \bar{A}) вызывает расфокусировку

$$l = -2\Delta X \sin\alpha \cdot \sin(\alpha + \beta)$$

и сдвиг

$$t = 2\Delta X \sin\alpha \cdot \cos(\alpha + \beta)$$

изображения. Данные формулы позволяют найти два особых взаимно перпендикулярных направления. При смещении системы зеркал вдоль одного из них возникает наибольшая возможная расфокусировка изображения без децентрировки (l_{\max} , $t = 0$), а при смещении вдоль другого направления появляется наибольшая децентрировка (сдвиг изображения) без расфокусировки ($l = 0$, t_{\max}). Положив $t = 0$, из условия

$$\cos(\alpha + \beta_I) = 0,$$

т. е. $\alpha + \beta_I = 90^\circ$, найдем особое направление I–I, которое перпендикулярно биссектрисе угла, образованного падающим (орт A) и выходящим (орт A') лучами. При этом

$$l_{\max} = -2\Delta X \sin \alpha.$$

Далее приняв $l = 0$ из условия

$$\sin(\alpha + \beta_{II}) = 0,$$

т. е.

$$\alpha + \beta_{II} = 0 \text{ или } \beta_{II} = \alpha,$$

найдем особое направление II–II, которое совпадает с упомянутой биссектрисой. При этом

$$t_{\max} = 2\Delta X \sin \alpha.$$

Видно, что положение указанных особых направлений зависит от направления падающих лучей, а не от положения углового зеркала.

Нахождение положений особых направлений в прямоугольном зеркале, пентапризме и полупентапризме показано на рис. 35.4.

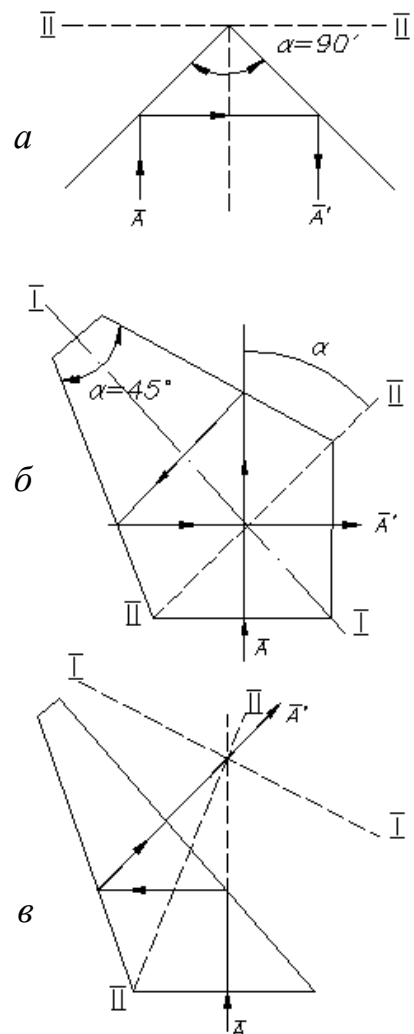


Рис. 35.4. Построение особых направлений в прямоугольном зеркале (а), пентапризме (б) и полупентапризме (в)

35.3.4. Фокусировка изображения с помощью автоматизированных систем

В фокальной плоскости объектива 1 (рис. 35.5) помещено фотосопротивление 2 с нелинейной характеристикой. Фототок такого элемента зависит от контраста изображения (наибольший контраст получается у сфокусированного изображения). В устройстве имеется еще фотосопротивление 3, контролирующее общий уровень освещенности. Сигналы с фотосопротивлений поступают в электронный блок 4 обработки сигналов, который управляет перемещением объектива 1 или фотосопротивления 2.

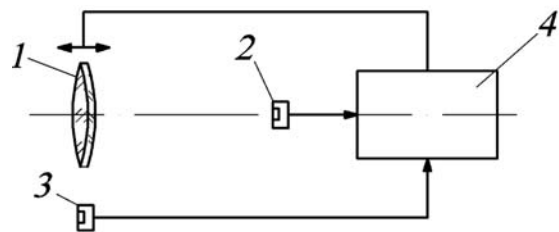


Рис. 35.5. Схема фокусировки изображения с помощью автоматизированных систем

Когда фотосопротивление 2 попадает в плоскость наилучшего изображения, фототок в цепи оказывается минимальным, что является сигналом для остановки перемещения объектива 1. Погрешность фокусировки для этой схемы составляет 0,2 мм.

35.4. Юстировка увеличения зрительной трубы

Изменение увеличения зрительной трубы достигается:

изменением фокусного расстояния объектива;

изменением эквивалентного фокусного расстояния системы, состоящей из объектива и длиннофокусного коллектива, обычно расположенного вблизи плоскости изображения.

Изменение фокусного расстояния объектива в телескопических системах осуществляется главным образом изменением воздушного промежутка между линзами, а изменение эквивалентного фокусного расстояния системы – смещением коллектива.

Фокусное расстояние двухлинзового объектива в целом через фокусные расстояния его компонентов выражается соотношением

$$\frac{1}{f'_{об}} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_1 f'_2}, \quad (35.4)$$

где $f'_{об}$ – фокусное расстояние объектива в сборе;

f'_1 и f'_2 – задние фокусные расстояния 1-го и 2-го компонентов объектива;

d – расстояние между главными плоскостями компонентов.

При подрезке промежуточного кольца между двумя компонентами объектива на величину Δd изменение фокусного расстояния

$$\frac{\Delta f'_{об}}{(f'_{об})^2} = \Delta d / f'_1 f'_2;$$

$$\Delta d = \frac{f'_1 f'_2}{f'_{об}} \frac{\Delta f'_{об}}{f'_{об}}.$$

В случае двухлинзового ахроматического объектива соотношения между фокусными расстояниями линз примерно таковы:

$$f'_1 \approx 0,5 f'_{об};$$

$$f'_2 \approx f'_{об},$$

поэтому

$$\Delta d \approx 0,5 \Delta f'_{об}; \quad \Delta f'_{об} = \frac{\Delta d}{0,5} = 2 \Delta d. \quad (35.5)$$

Эквивалентное фокусное расстояние f'_c системы, состоящей из объектива и дополнительного длиннофокусного коллектива, выражается соотношением типа (35.4), т. е.

$$\frac{1}{f'_c} = \frac{1}{f'_{об}} + \frac{1}{f'_к} - \frac{L}{f'_{об}f'_к},$$

где $f'_{об}$ и $f'_к$ – фокусные расстояния соответственно объектива и коллектива, а L – расстояние между их главными плоскостями.

Если учесть при этом, что $f'_к > f'_{об}$, например, в N раз ($f'_к = Nf'_{об}$), вследствие чего $f'_{об} \approx f'_c$, то

$$\Delta L \approx N\Delta f'_c; \quad \Delta f'_c = \frac{\Delta L}{N}. \quad (35.6)$$

Если $\Delta d = \Delta L$, то из (35.5) и (35.6) получаем

$$\Delta f'_c = \Delta f'_{об} / 2N,$$

т. е. если выполнить изменение d и L на одну и ту же величину, то в первом случае получим более значительное изменение увеличения зрительной трубы, поскольку при этом фокус объектива изменяется в $2N$ раз больше фокуса системы.

35.5. Регулировка увеличения в микроскопах

Видимое увеличение Γ микроскопа определяется выражением

$$\Gamma = V_{об} \Gamma_{ок}.$$

Отсюда следует, что видимое увеличение микроскопа может быть изменено путем изменения увеличений как окуляра $\Gamma_{ок}$, так и объектива $V_{об}$. Для скачкообразного изменения увеличения в микроскопах применяют сменные объективы и окуляры. Для плавного изменения увеличения иногда используют панкратические окуляры, но зачастую производят юстировку микроскопа.

С учетом изображений на рис. 35.6 линейное увеличение микрообъектива

$$V_{об} = y'/y = -\Delta/f', \quad (35.7)$$

где Δ – оптическая длина тубуса (оптический интервал) микроскопа.

Из (35.7) следует, что увеличение предмета (при отсутствии параллакса) можно юстировать следующими способами:

- изменением оптического интервала Δ ;
- изменением величины фокусного расстояния f' микрообъектива.

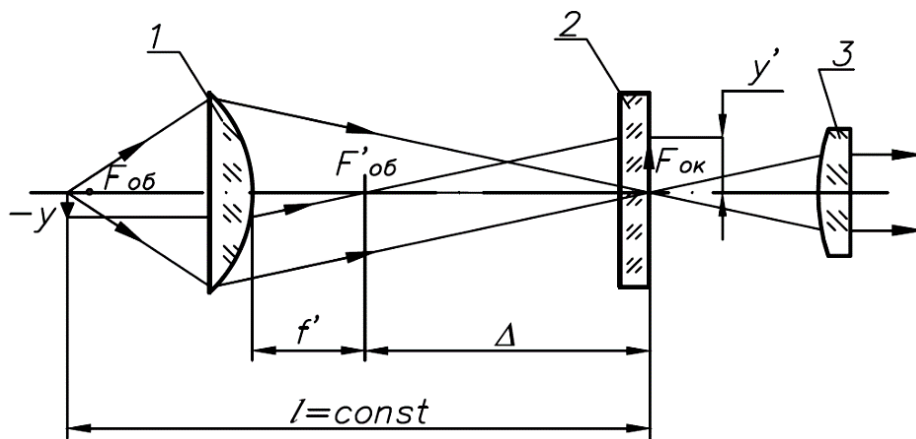


Рис. 35.6. Оптическая схема микроскопа:
1 – микрообъектив; 2 – сетка; 3 – окуляр

Глава 36. ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

36.1. Юстировка поворота изображения и разворота сетки в телескопических приборах

При неправильном расположении зеркально-призменных систем в телескопических приборах возникает поворот изображения, который вызывает ошибку в измерениях.

Поворот изображения и разворот сетки в телескопических приборах можно проверить при помощи отвеса и зрительной трубы с поперечным уровнем и отсчетным угломерным механизмом. Схема такой установки показана на рис. 36.1.

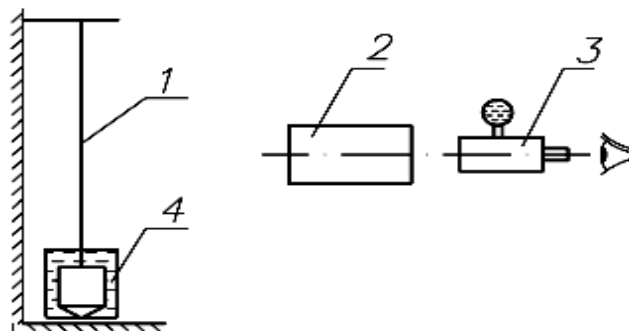


Рис. 36.1. Схема проверки поворота изображения

Испытуемый прибор 2 устанавливают таким образом, чтобы базовые поверхности занимали горизонтальное (вертикальное) положение. Перед объективом прибора должен быть подвешен отвес 1; груз отвеса помещают в емкость 4 с машинным маслом, которое служит демпфером колебательных движений отвеса.

За окуляром испытуемого прибора устанавливают зрительную трубку 3 с поперечным уровнем и отсчетным угломерным механизмом. Пузырек

уровня и шкалу отсчетного механизма перед измерением приводят в нулевое положение.

Если в контролируемом приборе имеет место поворот изображения, то нить отвеса будет изображаться повернутой относительно вертикального штриха сетки зрительной трубки. Вращением маховичка отсчетного механизма зрительную трубку Z поворачивают вокруг оптической оси так, чтобы вертикальный штрих ее сетки расположился строго параллельно изображению нити отвеса. По шкале отсчетного механизма зрительной трубки определяют угол поворота изображения нити отвеса вокруг оптической оси испытуемого прибора.

Вместо отвеса можно использовать коллиматор, вертикальный штрих сетки которого предварительно установлен по отвесу. В случае наличия поворота изображения его исправляют юстировкой призм и зеркал, входящих в оптическую систему испытуемого прибора.

Разворот сетки относительно конструктивных элементов испытуемого прибора проверяют и исправляют после юстировки поворота изображения. Эти операции выполняют на одной и той же контрольно-юстировочной установке (см. рис. 36.1). Ошибку установки сетки исправляют поворотом окуляра с сеткой в корпусной части контролируемого прибора или поворотом оправы с сеткой в окуляре. При отсутствии наклона сетки ее вертикальный штрих будет виден параллельным изображению нити отвеса.

36.2. Юстировка микроскопов

36.2.1. Сборка и юстировка осветительной системы микроскопа

Сборка конденсора во многом похожа на сборку объектива микроскопа и в ряде случаев осуществляется с такой же точностью. Важна центрировка оптической системы конденсора относительно оси его диафрагмы и оси всей осветительной системы относительно оси тубуса микроскопа. Это условие обеспечивается пригонкой механических деталей, которыми конденсорная система крепится к микроскопу.

Если ось осветительной системы не совмещена с осью тубуса микроскопа, то возникает несимметричное размытие контура объекта наблюдения, которое приводит к ошибке измерения.

Совпадение оси осветительной системы с осью тубуса микроскопа проверяют с помощью динаметра или диоптрийной трубки, наблюдая изображение диафрагмы осветителя в выходном зрачке микроскопа. Сделав отверстие диафрагмы осветителя несколько меньшим диаметра выходного зрачка микроскопа, наблюдают степень концентричности обеих диафрагм. При наличии видимой неконцентричности ее устраняют разворотом тубуса осветителя.

36.2.2. Контроль перпендикулярности оси тубуса плоскости предметного столика и параллельности его перемещения

Для выполнения операции контроля перпендикулярности оси тубуса на предметный столик помещают стеклянную пластинку с перекрестием и фокусируют на него микроскоп. Затем на пластинку с перекрестием устанавливают плоскопараллельную пластину значительной толщины d и повторно фокусируют микроскоп на резкое видение перекрестия. Если ось микроскопа наклонена к плоскости столика под углом β , то изображение наблюдаемого перекрестия сместится в плоскости сетки окуляра микроскопа на величину Δ . При этом

$$\beta = \frac{n\Delta}{d(n-1)},$$

где n – показатель преломления пластины.

Для проверки параллельности перемещения столика рядом с микроскопом на стойке устанавливают индикатор часового типа и его наконечник приводят в контакт с рабочей плоскостью столика. Перемещая столик в крайние положения, снимают отсчеты по индикатору. Разность отсчетов по всей длине хода столика должна находиться в пределах допуска, установленного техническими условиями.

36.3. Юстировка угломерных приборов

36.3.1. Основные ошибки угломерных приборов

В номинальной схеме угломерного прибора (рис. 36.2) в системе сферических координат xyz вертикальная ось вращения прибора должна совпадать с отвесной осью z , горизонтальная ось качания трубы должна быть перпендикулярна указанной вертикальной оси и в исходном положении направлена по оси x , а визирная ось трубы, которая должна быть перпендикулярна к горизонтальной оси, может качаться в плоскости yz начального меридиана от исходного положения, когда она совпадает с осью y .

К основным ошибкам изготовления и установки угломерного прибора относятся:

коллимационная ошибка – неперпендикулярность на малый угол k визирной оси трубы собственной горизонтальной оси качания;

наклон горизонтальной оси качания трубы – неперпендикулярность этой оси на малый угол l по отношению к вертикальной оси вращения прибора;

наклон вертикальной оси вращения – неотвесность ее установки на малый угол m .

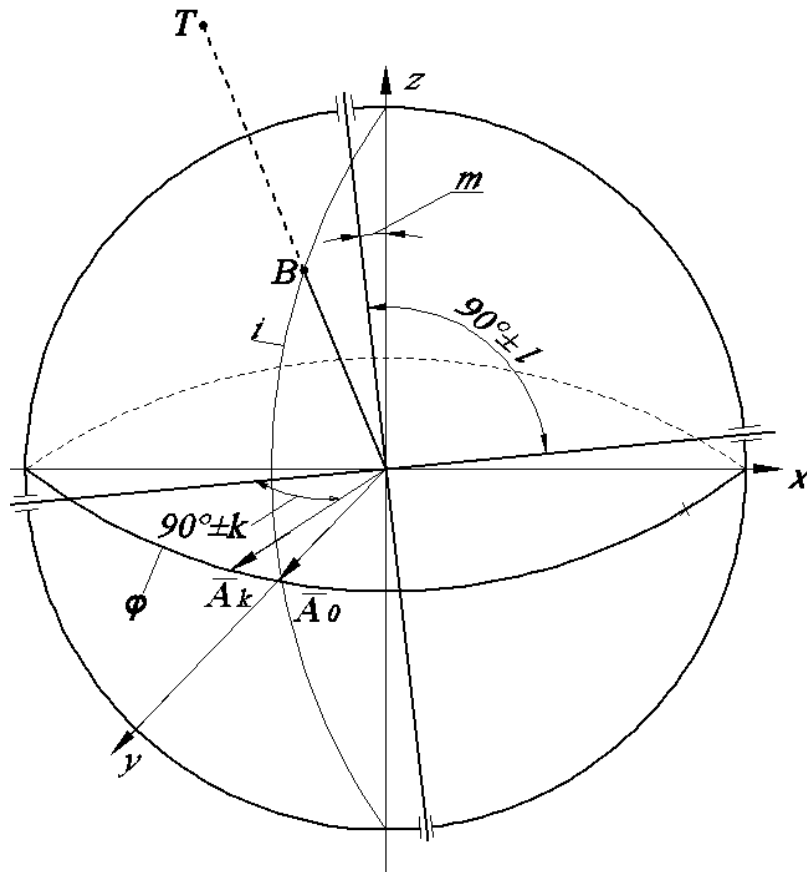


Рис. 36.2. Номинальная схема угломерного прибора

При измерении углов между двумя разновысокими точками с координатами φ_1, i_1 и φ_2, i_2 для ошибок $\Delta\varphi_{12}$ горизонтального и Δi_{12} вертикального углов можно получить следующие общие выражения:

$$\Delta\varphi_{12} = \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 = k (\sec i_1 - \sec i_2) + l (\operatorname{tgi}_1 - \operatorname{tgi}_2) + m [\sin(\varphi_m - \varphi_1) \operatorname{tgi}_1 - \sin(\varphi_m - \varphi_2) \operatorname{tgi}_2]; \quad (36.1)$$

$$\Delta i_{12} = \Delta i_1 - \Delta i_2 = m [\cos(\varphi_m - \varphi_1) - \cos(\varphi_m - \varphi_2)], \quad (36.2)$$

где φ_m – угол поворота прибора вокруг оси z от исходного направления.

Из формулы (36.1) видно, что погрешность горизонтального угла из-за наклона m вертикальной оси вращения не может быть скомпенсирована ошибками k и l , так как она зависит не только от угла i , но также и от величины самого измеряемого угла φ . Кроме того, наклон вертикальной оси дает погрешность при измерении и вертикальных углов, тогда как остальные две ошибки такой погрешности не вызывают (формула (36.2)). Поэтому можно заключить:

первичные ошибки k, l, m взаимно не компенсируются и должны устраняться каждая отдельно;

наибольшее влияние оказывает неотвесность вертикальной оси вращения угломерного прибора, так как она вызывает погрешности при измерениях как горизонтальных, так и вертикальных углов;

ошибки k и l вызывают погрешности лишь при измерении горизонтальных углов.

36.3.2. Устранение неотвесности вертикальной оси вращения

Если ось вращения неотвесна на угол m (рис. 36.3), то для устранения ошибки необходимо выполнить следующие операции:

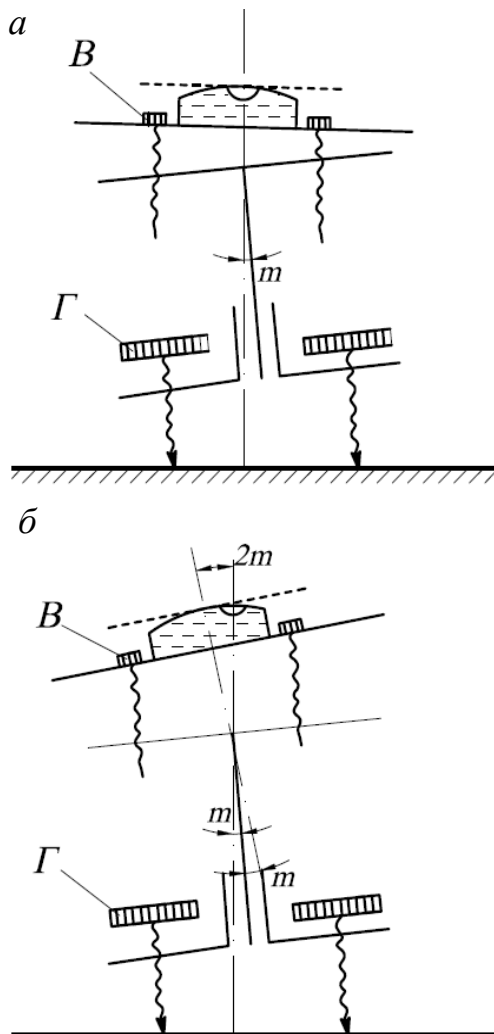


Рис. 36.3. Устранение неотвесности вертикальной оси вращения

1. Ось уровня установить вертикально, выводя его пузырек на середину винтами B (рис. 36.3, a).

2. Алидаду с уровнем повернуть вокруг вертикальной оси вращения прибора на 180° и отсчитать смещение пузырька уровня, которое равно удвоенному углу $2m$ (рис. 36.3, b).

3. Устранить выявленную неотвесность оси прибора, наклонив его винтами Γ треножника так, чтобы пузырек уровня оказался смещенным на половину отсчитанной величины; вторую половину смещения пузырька устранить винтами B при уровне. При необходимости выверку уточняют повторным выполнением всех трех операций.

Устранив неотвесность оси вращения в одной плоскости, алидаду с уровнем следует повернуть на 90° и теми же приемами устранить вторую составляющую неотвесности в перпендикулярной плоскости. В заключение проверяют отвесность установки вертикальной оси, следя за тем, чтобы при повороте алидады пузырек уровня не сдвигался с места (в пределах заданного допуска) на полный оборот.

После проведенной работы ошибку m можно считать близкой нулю. Тогда в формуле (36.1) останутся только два первых слагаемых, а формула (36.2) даст ноль.

36.3.3. Устранение коллимационной ошибки

Ошибки k и l при изменении вертикальной наводки в пределах от нуля до $i = 90^\circ$ влияют примерно одинаково: с увеличением угла i ошибки возрастают. Эти ошибки можно отделить друг от друга, если после визирова-

ния близкой к горизонту точки визирную трубу перевести через зенит и вновь визировать ту же точку, повернув прибор вокруг вертикальной оси. В этом случае разность тангенсов при ошибке l в формуле (36.1) будет равна нулю, а коэффициент при ошибке k – двум, т. е. коллимационная ошибка при переводе трубы через зенит удвоится.

Процесс устранения коллимационной ошибки заключается в следующем:

1. Трубу наводят в точку T вблизи горизонта; по горизонтальному лимбу снимают отсчет φ_1 , когда круг вертикального лимба – справа (кратко КП – «круг право»). Пусть отсчет $\varphi_1 = 0$ (рис. 36.4, *a*).

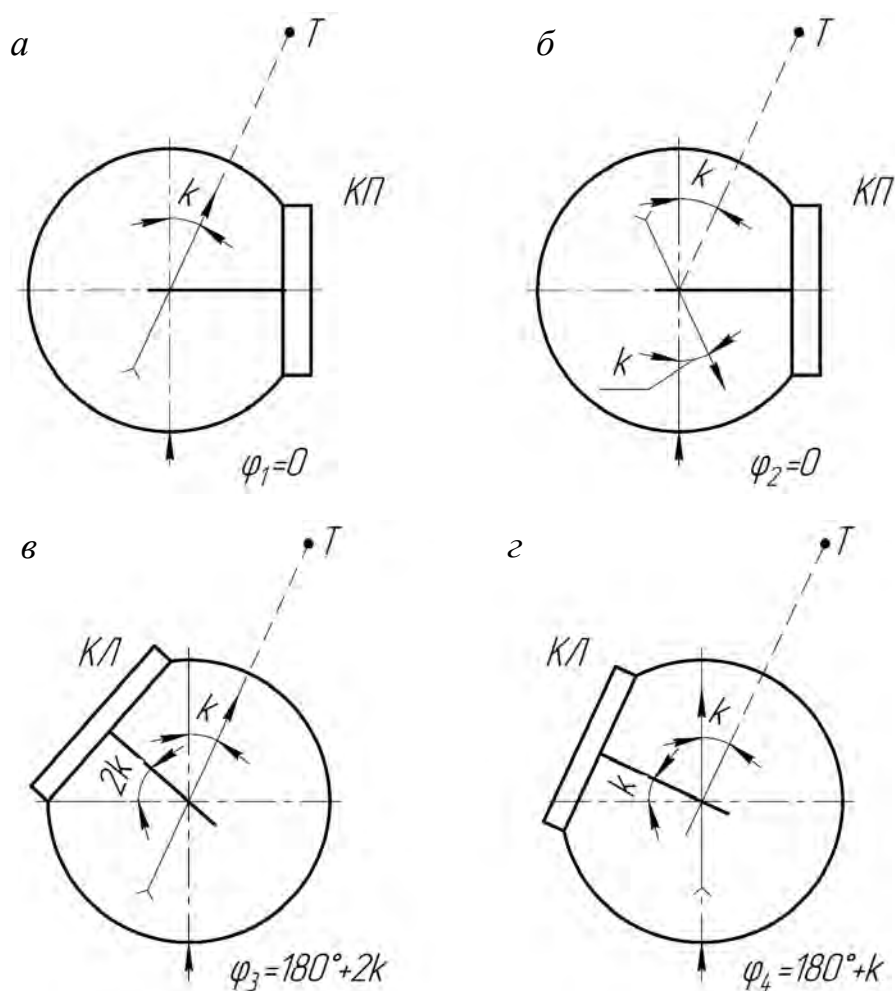


Рис. 36.4. Последовательность устранения коллимационной ошибки

2. Трубу переводят через зенит, после чего визирная ось займет зеркальное положение при неизменном горизонтальном отсчете $\varphi_2 = \varphi_1 = 0$ (рис. 36.4, *б*).

3. Трубу с алидадой горизонтального лимба поворачивают вокруг вертикальной оси (по часовой стрелке) и повторно визируют ту же точку T , но уже при круге слева (КЛ); отсчет φ_3 будет

$$\varphi_3 = 180^\circ + 2k.$$

Таким образом, величина коллимационной ошибки выявилась (рис. 36.4, в).

4. Трубу устанавливают под углом k к направлению на точку T (рис. 36.4, з), получив отсчет

$$\varphi_4 = 180^\circ + k.$$

5. Коллимационную ошибку устраняют, наклонив визирную ось трубы поперечным сдвигом сетки с помощью ее боковых регулировочных винтов так, чтобы точка T изображалась в центре перекрестия. Теперь в формуле (36.1) останется только второе слагаемое – погрешность от наклона горизонтальной оси.

36.3.4. Устранение наклона горизонтальной оси качания зрительной трубы

Ошибка наклона горизонтальной оси можно устранить тем точнее, чем выше выбрана точка наводки T , поскольку накопленная погрешность горизонтального угла пропорциональна тангенсу вертикального.

Зрительную трубу наводят в точку T , например при КЛ; трубу опускают и первый отсчет n_1 снимают по горизонтально расположенной стеклянной линейке (рис. 36.5, а).

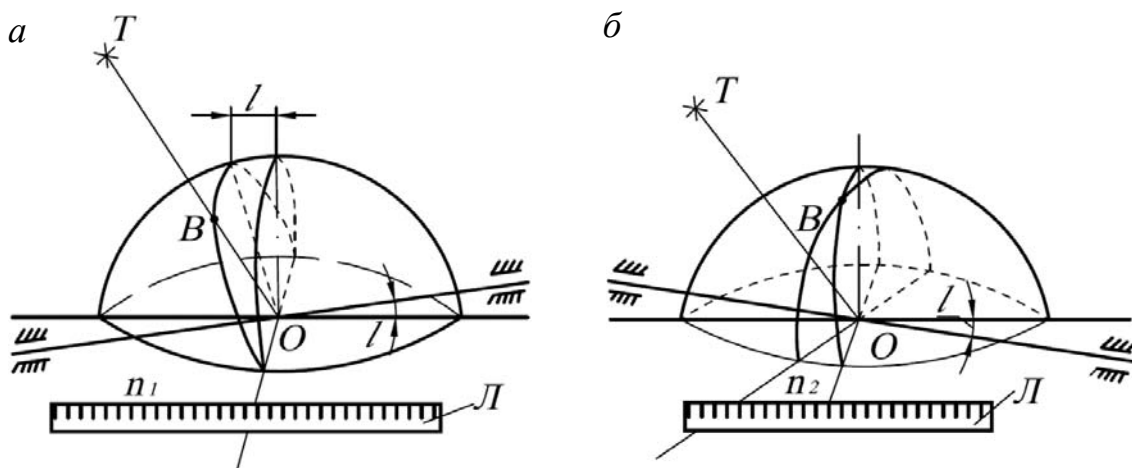


Рис. 36.5. Устранение ошибки наклона горизонтальной оси качания

Трубу переводят через зенит, алидаду горизонтального лимба поворачивают на пол-оборота (положение КП), трубу наводят в ту же точку T , затем опускают трубу и по линейке снимают второй отсчет n_2 (рис. 36.5, б).

Для устранения наклона горизонтальной оси поворотом алидады горизонтального лимба в обратном направлении трубу устанавливают по линейке на средний отсчет n_{cp} :

$$n_{cp} = 0,5 (n_1 + n_2);$$

трубу поднимают на высоту точки наводки T и винтами при лагере наклоняют горизонтальную ось так, чтобы перекрестие сетки трубы совместились с точкой T .

36.4. Юстировка зрительной трубы с двумя сетками

К трубе с призмой «куб» и двумя сетками предъявляются следующие требования: сетки 5 и 9 (рис. 36.6) должны быть установлены в фокальной плоскости объектива 1; визирная ось трубы должна быть перпендикулярна переднему торцу А корпуса 2; грань Б призмы 3 должна быть параллельна плоскости сетки 5.

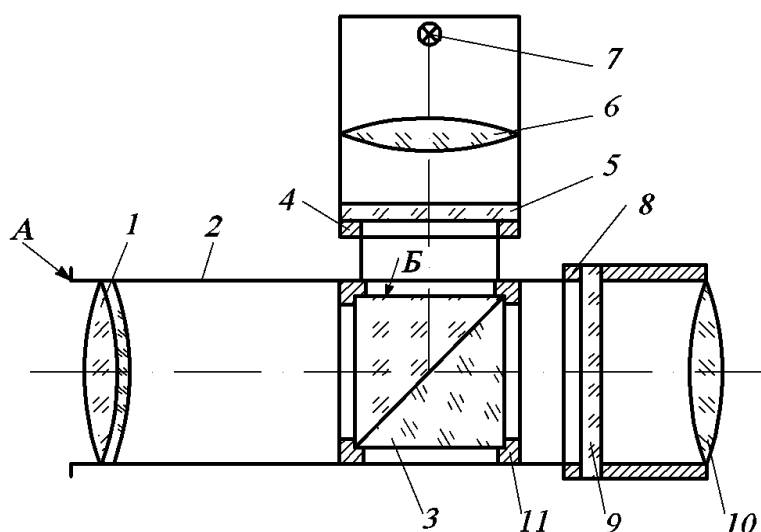


Рис. 36.6. Труба с призмой «куб» и двумя сетками

Для установки сеток 5 и 9 в фокальную плоскость объектива 1 необходимо хотя бы одну из них (например, основную сетку 9) предварительно установить в эту плоскость. Для этого можно воспользоваться автоколлимационным методом, превратив окуляр с кубиком в окуляр Гаусса следующим образом. За окуляром 10 поместить наклонную прозрачную пластинку, с ее помощью источником 7 с конденсорной линзой 6 осветить штрихи сетки 9 и через эту же пластинку наблюдать сетку 9 и ее автоколлимационное изображение от плоского зеркала, установленного перед объективом 1. Резкое изображение сетки 9 должно совпадать с плоскостью штрихов самой сетки, что будет соответствовать ее установке в фокусе объектива. Добиться этого можно подгонкой толщины параллаксного кольца 8.

После юстировки сетки 9 включают источник 7 и через окуляр 10 наблюдают автоколлимационное изображение (отраженное от приложенного к торцу А зеркала) сетки 5 в плоскости сетки 9. Резкого видения изображения сетки 5 добиваются подгонкой толщины параллаксного кольца 4.

Для установки сеток 5 и 9 в фокальную плоскость объектива 1 можно воспользоваться коллиматором с сеткой. Сетки 9 и 5 будут установлены в фокальной плоскости объектива 1, если они одинаково резко видны в плоскости сетки коллиматора.

После юстировки сеток 5 и 9 куб-призму 3 устанавливают в правильное положение. Для этого на посадочное место сетки 5 помещают полированную плоскопараллельную стеклянную пластинку и с помощью вспомогательной автоколлимационной трубки наблюдают блики от грани Б куба-призмы 3 и от стеклянной пластинки. Данные блики должны быть совмещены, что достигается разворотом мостика 11 с кубом-призмой (для разворота имеются стопорные винты).

Для обеспечения перпендикулярности визирной оси трубы переднему торцу А ее корпуса первоначально следует превратить окуляр с призмой «куб» в окуляр Гаусса и поперечными перемещениями сетки 9 ее изображение (отраженное от приложенного к торцу А плоского зеркала) совместить с самой этой сеткой. Затем поперечными перемещениями сетки 5 изображение центра ее перекрестия совместить с центром перекрестия сетки 9. Данную операцию также можно назвать центрированием сеток.

36.5. Юстировка автоколлимационной установки А. Н. Захарьевского

Установка А. Н. Захарьевского предназначена для регулировки биноклей при сборке. Основным узлом в установке является коллиматор (рис. 36.7). Он состоит из лампы 1, конденсора 2, точечной диафрагмы 3, наклонных плоских зеркал 4 и 5, объектива 6, главного плоского зеркала 7 и экрана 8. Диафрагма 3 и экран 8 совпадают с фокальной плоскостью объектива. Поэтому на зеркало 7 падает параллельный пучок света, который после отражения от зеркала в обратном направлении фокусируется объективом на экране 8, где наблюдают изображение освещенной диафрагмы 3 – световой «зайчик».

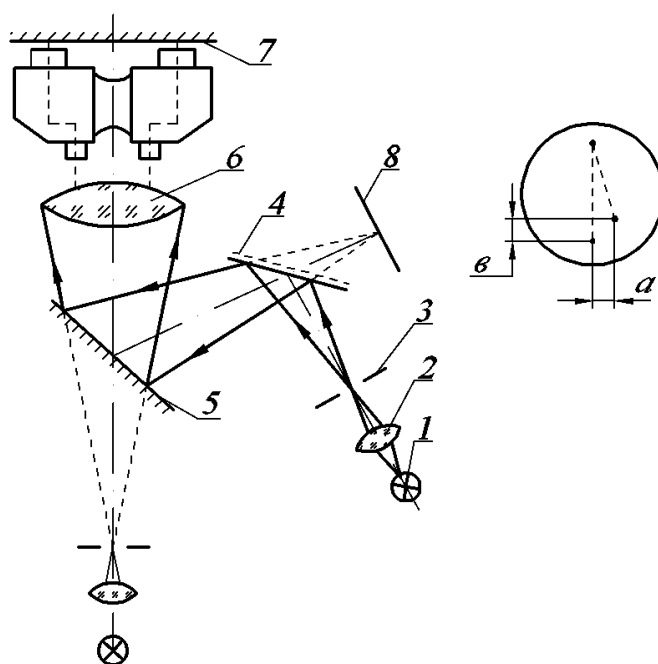


Рис. 36.7. Схема установки А. Н. Захарьевского

Контролируемый бинокль помещают в параллельный ход лучей между объективом 6 и главным зеркалом 7. Части светового пучка, проходящие сквозь обе трубки бинокля в прямом и обратном направлениях, на экране 8 дадут два блика, которые используют при контроле бинокля на установке. Пользуясь диоптрийной установкой окуляров, можно добиться наилучшей резкости обоих бликов. Если пучки лучей, выходящие из обеих трубок бинокля, параллельны, то блики совпадут друг с другом. При наклоне бинокля оба блика будут совместно перемещаться по экрану и при этом могут несколько разойтись друг от друга как в направлении наклона бинокля из-за неравенства увеличений в трубках, так и в поперечном направлении из-за перекоса изображений в призменных биноклях.

Юстировку коллиматора целесообразно выполнять в следующей последовательности:

1. Экран 8 совместить с фокальной плоскостью объектива 6. Проще всего это сделать наклонами зеркала 5, а контролировать – по параллельности плоскости изображения экрана 8 по отношению к опорному торцу оправы объектива 6. Если при расточке этой оправы заодно подрезать и верхний ее торец, т. е. обработать его параллельно опорному торцу посадочного места под объектив, то, положив на верхний торец оправы плоскопараллельную пластинку (зеркало), наклонами зеркала 5 следует добиться параллельности изображения экрана 8 в зеркале 5 по отношению к этой пластинке. Фокусировку можно проконтролировать автоколлимационным методом или же с помощью зрительной трубы, установленной на бесконечность.

2. Диафрагму 3 совместить с фокусом объектива 6 так, чтобы она резко изображалась в плоскости экрана 8 после отражения от зеркала 7, и центрировать осветитель так, чтобы объектив 6 был полностью заполнен светом, а ось выходящего из него светового пучка была перпендикулярна зеркалу 7. Эту операцию следует выполнить наклонами, поворотами и смещениями зеркала 4, диафрагмы 3 и самого осветителя.

Глава 37. ЮСТИРОВКА ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

37.1. Особенности приборов ночного видения

Идущие от объекта u ИК-лучи попадают в объектив 1 оптико-электронного прибора (рис. 37.1) и создают невидимое изображение u' в ИК-лучах на фотокатоде А электронно-оптического преобразователя (ЭОП) 2. Это невидимое изображение в ЭОП преобразуется в видимое u'' на экране Б, т. е. оптическое изображение с одним спектральным составом преобразуется в оптическое изображение с другим спектральным составом (с переходом через промежуточное электронное изображение), которое рассматривают через окуляр 3 прибора.

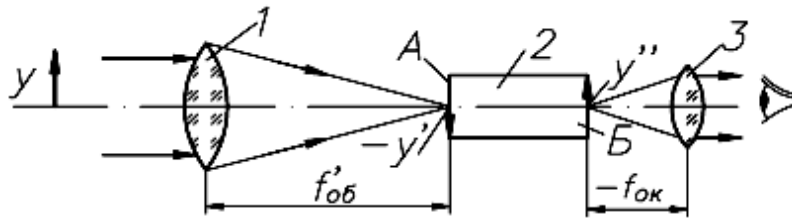


Рис. 37.1. Схема опто-электронного прибора ночного видения

Электронно-оптический преобразователь одновременно выполняет роль оборачивающей системы, поэтому его линейное увеличение $\beta_{ЭОП}$ является величиной отрицательной и обычно $\beta_{ЭОП} = -(0,63-1,5)^x$.

Видимое увеличение Γ всей опто-электронной системы прибора ночного видения (ПНВ) определяется из соотношения

$$\Gamma = \frac{-f'_{об}}{f'_{ок}} \beta_{ЭОП}.$$

Так как $\beta_{ЭОП}$ – величина отрицательная, то ПНВ формирует прямое изображение.

Важными характеристиками ОЭП являются разрешающая способность, измеряемая числом линий, видимых раздельно на 1 мм длины фотокатода, и чистота поля зрения. В центре поля зрения ЭОП разрешающая способность достигает 50 линий на 1 мм и несколько снижается к краям поля.

Разрешающая способность объектива совместно с электронно-оптическим преобразователем (т. е. разрешающая способность ПНВ) рассчитывается по формуле

$$\alpha'' = 206\,265 \frac{1}{R_{ЭОП} f'_{об}},$$

где 206 265 – число угловых секунд в одном радиане;

$R_{ЭОП}$ – разрешающая способность фотокатода ЭОП;

$f'_{об}$ – фокусное расстояние объектива прибора.

Как следует из приведенной формулы, предел разрешения ПНВ не зависит от его видимого увеличения Γ . Однако минимальное увеличение должно быть таким, чтобы глаз наблюдателя полностью использовал возможности прибора. Поэтому видимое увеличение Γ в приборах ночного видения должно удовлетворять следующему условию:

$$\Gamma \geq \frac{60''}{\alpha''},$$

где 60'' – средняя разрешающая сила глаза.

37.2. Сборка и контроль приборов

Сборка, юстировка и контроль оптических приборов ночного видения основаны на тех же принципах, что и приборов, работающих в видимой области спектра.

Юстировку и проверку прибора ночного видения и его отдельных узлов осуществляют в инфракрасных лучах. Для этого в осветителях контрольно-юстировочных приборов устанавливают светофильтры типа ИКС-2, пропускающие ИК-лучи спектральной области $\lambda = 0,8-1,2$ мкм.

37.2.1. Контроль и устранение параллакса в приборе ночного видения

При устранении параллакса в ПНВ между изображением объекта и плоскостью фотокатода ЭОП объект должен находиться на конечном расстоянии, равном дальности действия ПНВ. Для получения такого расстояния миру, установленную в фокальной плоскости объектива используемого коллиматора, смещают вдоль оси к его объективу. При этом из коллиматора выходит пучок расходящихся лучей, несущих изображение миры с расчетной дальности.

Необходимое смещение x' миры в соответствии с заданной дальностью действия D ПНВ рассчитывают по формуле

$$x' = \frac{(f'_{об})^2}{D + f'_{об} - l},$$

где $f'_{об}$ – фокусное расстояние объектива коллиматора;

l – расстояние от передней главной плоскости объектива коллиматора до плоскости фотокатода ЭОП испытуемого прибора.

Параллакс приборов ночного видения устраняют перемещением объектива вдоль его оптической оси.

Прибор считается годным, если в поле его зрения (на экране ЭОП) резко видны изображение расчетного элемента миры коллиматора по всем четырем направлениям его штрихов и марка фотокатода ЭОП.

37.2.2. Определение увеличения и угла поля зрения прибора ночного видения

Увеличение прибора ночного видения 5 (рис. 37.2) проверяют с помощью широкоугольного коллиматора 4, сетка 3 которого освещается инфракрасным светом. Намечают некоторый участок шкалы сетки 3, подсвеченной через матовое стекло 1 и ИК-светофильтр 2, и с помощью зрительной трубки 6 рассматривают его через проверяемый прибор.

Величину изображения выбранного участка шкалы сетки 3 измеряют по шкале сетки зрительной трубки (первый отсчет). Испытуемый прибор 5 удаляют и повторно измеряют величину изображения выбранного участка шкалы сетки 3 (второй отсчет). Отношение первого отсчета ко второму равно увеличению ПНВ 5.

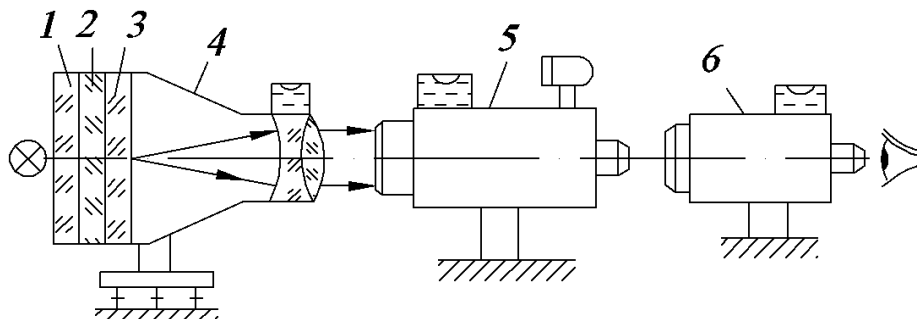


Рис. 37.2. Схема проверки увеличения прибора ночного видения

Угол поля зрения проверяют с помощью того же широкоугольного коллиматора (без зрительной трубки 6). Для этого через окуляр испытуемого прибора определяют участок шкалы сетки 3, видимый в пределах диаметра фотокатода ЭОП.

37.2.3. Установка дополнительной шкалы в поле зрения прибора ночного видения

Если в оптическую систему ПНВ необходимо ввести сетку (измерительную или прицельную), то ее можно закрепить со стороны экрана ЭОП, как показано на рис. 37.3.

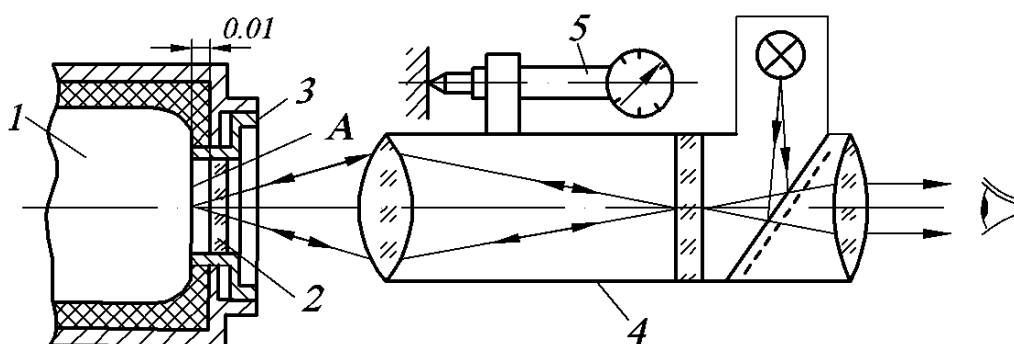


Рис. 37.3. Контрольно-юстировочный прибор для установки дополнительной сетки в оптическую схему прибора ночного видения

При этом расстояние между экраном А ЭОП 1 и плоскостью гравировки сетки 2 не должно превышать 0,01 мм. Данное требование можно выполнить, если использовать длиннофокусный микроскоп 4 с автоколлимационным окуляром и внешним отсчетным устройством 5 в виде, напри-

мер, индикатора часового типа. По шкале индикатора снимают два отсчета: при наводке микроскопа на резкое видение экрана ЭОП и шкалы сетки 2. Разность между этими отсчетами не должна превышать 0,01 мм, что достигается подшлифовкой торца оправы 3 и обеспечивает резкое видение одновременно марки ЭОП и сетки 2 через окуляр ПНВ.

37.3. Цоколевка и проверка электронно-оптического преобразователя

Цоколевку ЭОП выполняют на специальном контрольно-юстировочном приборе, показанном на рис. 37.4.

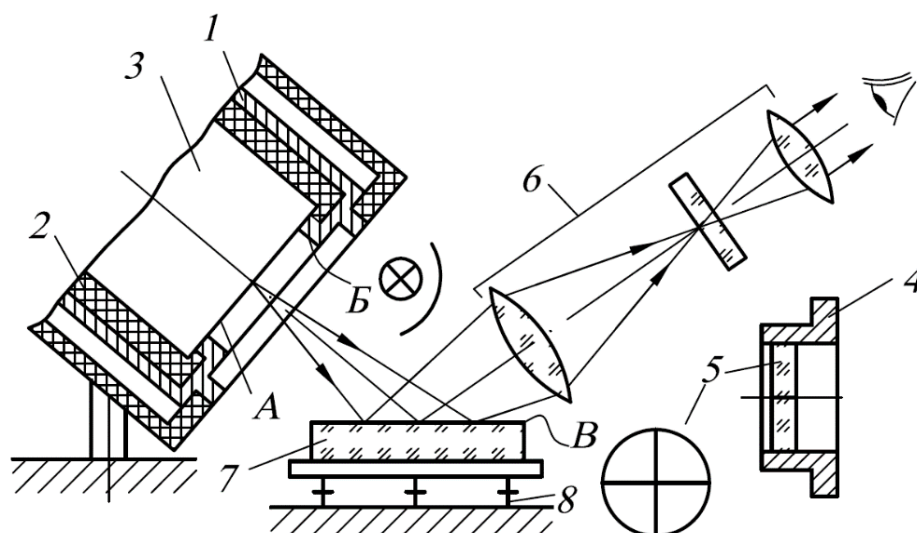


Рис. 37.4. Контрольно-юстировочный прибор для цоколевки ЭОП

ЭОП 3 устанавливают в цоколе 1 и заливают его токопроводящей цоколевочной массой 2 в виде глетоглицеринового клея с добавлением графита. Перед установкой ЭОП внутренние поверхности цоколя тщательно обезжиривают и протирают ватным тампоном, смоченным спиртом.

При цоколевке осуществляют центрирование марки экрана А ЭОП относительно посадочной поверхности Б цоколя 1.

Для этого первоначально на посадочную поверхность Б цоколя 1 устанавливают оправу 4 с сеткой 5 в виде перекрестия и продольными перемещениями длиннофокусного микроскопа 6 наводят на резкое видение сетки 5. Затем наклонами стеклянной пластины 7 с точно отполированной поверхностью В винтами 8 добиваются совмещения изображения центра сетки 5 с центром сетки микроскопа 6 (центрирование микроскопа относительно оси цоколя 1). Далее смещениями ЭОП в еще неотвердевшей цоколевочной массе 2 обеспечивают совмещение изображения центра марки экрана А с центром сетки микроскопа 6. Выполнение отмеченных операций обеспечивает совмещение оси ЭОП 3 с осью цоколя 1, т. е. их центрирование.

Качество изображения и разрешающую способность закрепленного в цоколе ЭОП проверяют на контрольно-юстировочном приборе, представленном на рис. 37.5.

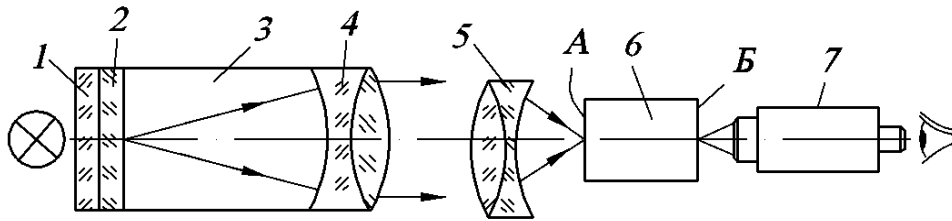


Рис. 37.5. Контрольно-юстировочный прибор для проверки качества изображения электронно-оптического преобразователя

В фокальной плоскости объектива 4 коллиматора 3 устанавливают миру 2, которую освещают инфракрасным светом (через ИК-светофильтр 1). Перед объективом 4 коллиматора помещают объектив 5 (обычно для этой цели используют фотообъективы с фокусным расстоянием $f' = 50$ мм и относительным отверстием 1:2). Испытуемый ЭОП 6 устанавливают за объективом 5 так, чтобы фотокатод А находился в фокальной плоскости этого объектива; на ЭОП подают напряжение. Изображение миры на экране Б ЭОП рассматривают через микроскоп 7. ЭОП считается годным, если резко видны все четыре направления расчетного элемента миры.

37.4. Согласование визирной оси прибора ночного видения с его посадочным местом и направлением светового пучка прожектора

Визирную ось ПНВ относительно его посадочного места юстируют на контрольно-юстировочном приборе, состоящем из коллиматора 3 (рис. 37.6) и кронштейна 4, опорная поверхность А которого параллельна визирной оси коллиматора (коллиматор и кронштейн выставляют по уровню).

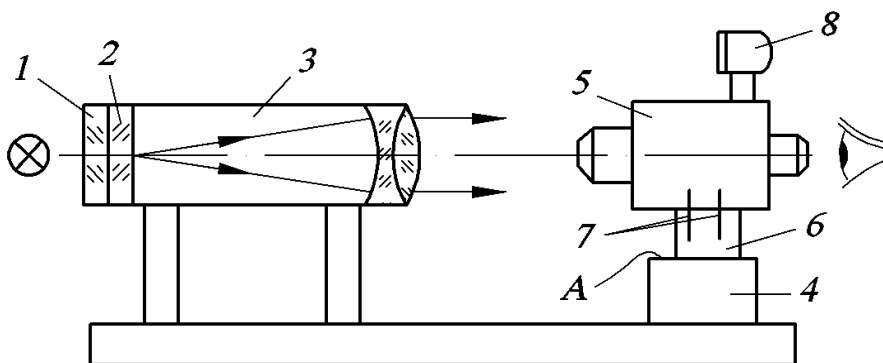


Рис. 37.6. Контрольно-юстировочная установка для согласования визирной оси прибора ночного видения с его посадочным местом

Процесс согласования визирной оси ПНВ с посадочным местом его штатного кронштейна 6 сводится к следующему: испытуемый прибор 5 с помощью его штатного кронштейна 6 неподвижно закрепляют на опорной по-

верхности A кронштейна 4. Затем ослабляют винты 7 крепления кронштейна 6 к прибору 5 и разворотами последнего добиваются совмещения изображения центра сетки 2, подсвеченной через светофильтр 1, коллиматора 3 с центром марки ЭОП. После этого прибор 5 окончательно закрепляют винтами 7 на кронштейне 6.

Далее ось светового пучка ИК-прожектора 8 согласовывают с визирной осью ПНВ. Эту операцию осуществляют на контрольно-измерительной установке, изображенной на рис. 37.7.

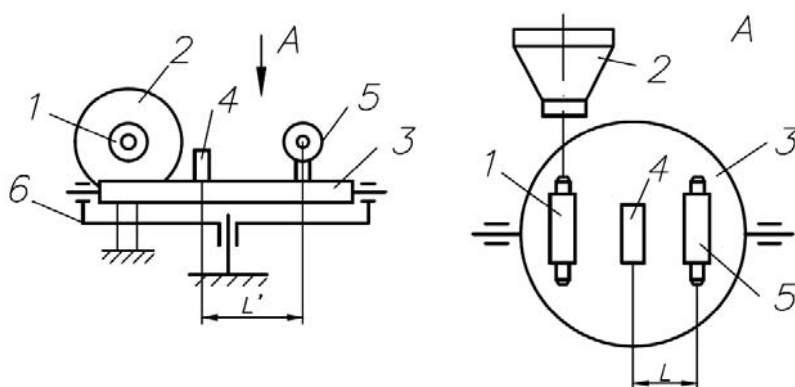


Рис. 37.7. Установка для согласования оси прожектора с осью прибора

На верхней поворотной плите 3 имеется базовый кронштейн 4, установочная поверхность которого расположена параллельно визирной оси контрольной зрительной трубки 5, закрепленной на верхней плите. Таким образом, визирная ось предварительно настроенного (на скамье, см. рис. 37.7) испытуемого ПНВ, установленного с помощью своего штатного кронштейна 6 на кронштейн 4, занимает положение, параллельное визирной оси контрольной трубки 5.

Перед проверяемым ПНВ на расстоянии, указанном в ТУ, размещают щит с фотоэлементом, соединенным с отсчетным устройством. На этом же щите на расстоянии L от центра фотоэлемента (L – расстояние между осью трубки 5 и осью симметрии кронштейна 4, т. е. визирной осью испытуемого ПНВ) имеется перекрестие, на которое наводят центр сетки зрительной трубки 5 (вращением стола 6 и наклоном плиты 3). Затем перемещениями прожектора на корпусе ПНВ добиваются такого его положения, при котором на шкале отсчетного устройства будет максимальное показание, что соответствует заданному расположению оси пучка ИК-лучей относительно визирной оси прибора.

Далее определяют углы рассеяния прожектора. Для этого наклонами и поворотом ПНВ с помощью плиты 3 и стола 6 по шкале отсчетного устройства фиксируют минимально допустимую освещенность на фотоэлементе. Наблюдая в окуляр зрительной трубки 1, предварительно выставленной соосно с широкоугольным коллиматором 2, по шкале последнего измеряют угол рассеяния в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Значения углов рассеяния для приборов каждого типа устанавливаются в ТУ.

Глава 38. ИСПЫТАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

38.1. Классификация испытаний и способов их проведения

38.1.1. Классификация испытаний

Все применяемые методы испытаний подразделяются на две большие группы: физические испытания реальных приборов или их макетов и испытания с использованием моделей.

Физические испытания могут проводиться как при внешних воздействующих факторах, создаваемых искусственным путём с помощью испытательных стендов (стендовые испытания) или специальных методов и средств, применяемых в лабораторных условиях (лабораторные испытания), так и при естественных воздействующих факторах.

Лабораторные и стендовые испытания приборов отличаются от реальной эксплуатации тем, что при их проведении не представляется возможным моделировать все внешние воздействия одновременно в той случайной совокупности, которая имеет место при реальной эксплуатации. Поэтому при исследовании влияния внешних воздействующих факторов наряду с лабораторными и стендовыми испытаниями проводятся испытания приборов в естественных условиях окружающей среды.

В зависимости от условий и места проведения испытаний при воздействии естественных внешних факторов различают полигонные и натуральные испытания приборов.

Цель полигонных и натуральных испытаний – исследование комплексного влияния факторов, естественно воздействующих на изменение параметров, свойств и механизмы отказов приборов при их эксплуатации и хранении. Эти испытания обеспечивают получение наиболее полной и достоверной информации о комплексном влиянии факторов окружающей среды на параметры, характеризующие прибор; позволяют исследовать характер реальных физико-химических процессов, протекающих в материалах и комплектующих изделиях прибора при воздействии естественных внешних факторов; дают возможность уточнять данные, полученные при испытании объекта под воздействием внешних факторов, создаваемых искусственным путём, а также нормы на допустимые изменения параметров (критерии годности). По результатам полигонных и натуральных испытаний разрабатывают рекомендации по способам защиты приборов от внешних воздействующих факторов.

К физическим испытаниям при естественных внешних воздействующих факторах следует отнести также *эксплуатационные испытания*, т. е. испытания объекта, проводимые при эксплуатации. Одним из основных видов эксплуатационных испытаний является *опытная эксплуатация* приборов.

Испытания с использованием моделей осуществляются методами физического и математического моделирования. Применение этих методов позволяет отказаться от ряда сложных физических испытаний приборов.

38.1.2. Виды испытаний

Порядок и содержание испытаний приборов зависят от того, является ли он опытным образцом или серийно выпускаемым изделием.

Испытания опытных образцов делятся на предварительные и государственные.

При *предварительных испытаниях* проверяют соответствие опытного образца (макета) заданным условиям и его выходные характеристики. По полученным данным отрабатывают технические условия.

При *государственных испытаниях* опытный образец проверяют на соответствие заданным условиям и решают вопрос о возможности запуска таких приборов в серийное или массовое производство.

В серийном производстве изготовленные приборы подвергают испытаниям, которые можно разделить на приемные, приемосдаточные, периодические (типовые контрольные) и проверочные.

Приемные испытания приборов проводит отдел технического контроля. Цель их – проверка соответствия изготовленных приборов требованиям технической документации или эталона (образца).

Приемные испытания могут быть *сплошными* (сто процентными), когда испытанию подвергают каждый из изготовленных приборов, и *выборочными*, когда дополнительным испытаниям по другим параметрам подвергают отдельные, произвольно выбранные приборы из числа прошедших сто процентные испытания.

При сплошных испытаниях приборы, не удовлетворяющие установленным требованиям, возвращают без дальнейших испытаний всех остальных приборов.

Если хотя бы один из приборов, отобранных для выборочных испытаний, не выдержал какой-либо проверки, всю партию возвращают для повторной проверки и исправления.

При *приемосдаточных испытаниях* приборы проверяет представитель заказчика. В ряде случаев (например, при необходимости использования сложного поверочного оборудования) приемосдаточные испытания совмещают с приемными, которые проводят при участии представителя заказчика.

Периодические (контрольные) испытания приборов проводят для проверки их на соответствие всем требованиям технических условий. Эти испытания проводят не реже одного раза в год, причем испытаниям подвергают несколько приборов, взятых выборочно из числа прошедших приемосдаточные испытания.

Проверочные испытания проводят для определения соответствия приборов требованиям технических условий при изменении принципиальной схемы, конструкции или технологии.

Программа проверочных испытаний должна предусматривать проверку тех параметров, на которые могли повлиять изменения схемы, конструкции или технологии.

38.1.3. Способы проведения испытаний

В настоящее время применяются следующие способы проведения испытаний: последовательный, параллельный, последовательно-параллельный и комбинированный.

При *последовательном способе* один и тот же объект испытания последовательно подвергается всем предусмотренным программой испытаниям.

Важным условием проведения последовательных испытаний является соблюдение определенного порядка воздействия внешних факторов. Иногда предусматривают такую последовательность внешних воздействующих факторов на объект, согласно которой вначале действуют наиболее сильно влияющие на объект внешние факторы. Это делается для скорейшего выявления потенциально ненадежных образцов с целью сокращения времени испытаний. Однако при этом теряется большая часть информации о влиянии других видов факторов, которая могла быть получена при их воздействии. Поэтому чаще на практике начинать испытания рекомендуется с воздействия на прибор наименее жестких внешних факторов, при которых воздействие будет наименьшим. Такой способ испытаний позволяет точнее определить причины наблюдаемых отказов и составить наиболее полную картину о наличии в приборе потенциальных дефектов. С другой стороны, если наиболее воздействующие на объект внешние факторы расположить в конце последовательных испытаний, то время их проведения значительно увеличивается.

При *параллельном способе* проведения испытаний образец подвергается одновременному воздействию различных внешних воздействующих факторов одновременно (параллельно) на нескольких выборках. Такой способ позволяет получить большой объем информации за значительно более короткий промежуток времени, чем последовательный, при минимальном износе испытываемых образцов.

При *последовательно-параллельном способе* все изделия, отобранные для испытаний, разбиваются на несколько групп, которые испытываются параллельно. В каждой из групп испытания проводят последовательным способом.

С целью приближения лабораторных условий испытаний объекта к реальным условиям его эксплуатации все большее распространение получает комбинированный способ испытаний, при котором на объект испытания воздействуют несколько внешних факторов. Так, для имитации условий вибрации объекта в космическом пространстве используют лабораторные испытания на вибрацию при одновременном воздействии на объект температуры и вакуума.

В заключение следует отметить, что многообразие разрабатываемой и выпускаемой аппаратуры не позволяет однозначно дать рекомендации по выбору того или иного способа и порядка приложения внешних воздействующих факторов при лабораторных испытаниях. Но можно с полной уверенностью сказать, что выбор алгоритма испытаний должен проводить-

ся исходя из результатов воздействий того или иного фактора на конкретный вид объекта испытаний и условий его последующей эксплуатации, чтобы в процессе испытаний механизм отказов приборов усиливался и все потенциально ненадежные образцы были обязательно выявлены.

38.2. Механические испытания

38.2.1. Испытания на виброустойчивость и вибропрочность

Испытания на *виброустойчивость* проводят с целью проверки способности прибора выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах значений, указанных в ТУ, непосредственно в условиях вибрации в заданном диапазоне частот и ускорения. Испытания проводят при включенной аппаратуре прибора, контролируя его выходные характеристики. Для проверки виброустойчивости выбирают те параметры испытуемых приборов, по наблюдению за которыми можно судить о виброустойчивости (например, уровень виброшумов, искажение выходного сигнала и т. д.).

Испытания на *вибропрочность* проводят при отключенной аппаратуре прибора с целью проверки его способности противостоять разрушающему действию вибрации и сохранять свои параметры после ее воздействия в пределах значений, указанных в ТУ.

Испытания приборов на виброустойчивость и вибропрочность можно проводить методами фиксированных частот, качающейся частоты, широкополосной случайной вибрации.

Основным условием, позволяющим выбрать наиболее рациональный метод испытаний, является знание резонансных частот изделия. Например, если резонансная частота превышает верхнюю частоту диапазона испытаний более чем в 1,5 раза, применяется метод испытаний на одной фиксированной частоте. В случае, когда резонансные частоты не установлены, применяется метод качающейся частоты. Если испытуемый прибор имеет не менее четырёх резонансов в заданном диапазоне частот, применяется метод случайной вибрации.

Когда необходимо сократить время испытаний при сохранении их диапазона, применяется метод ускоренных испытаний, основанный на наличии следующей закономерности влияния вибрационных нагрузок на долговечность изделия:

$$(j_y / j_0)^k = T_0 / T_y,$$

где j_y, j_0 – амплитуда вибрационного ускорения при обычных и ускоренных испытаниях соответственно;

k – показатель степени, зависящей от особенностей конструкции и материала изделия ($k = 2-10$);

T_0, T_y – продолжительность обычного и ускоренного испытаний.

Наиболее жесткому испытанию соответствует $k = 2$, поскольку при таком показателе степени продолжительность испытания будет максимальной. При увеличении амплитуды ускорения и сокращении продолжительности воздействия вибрации необходимо следить за тем, чтобы механизм отказов испытываемых приборов по мере увеличения значения ускорения оставался неизменным по сравнению с обычными условиями испытаний.

Метод испытаний на фиксированных частотах вибрации заключается в последовательном воздействии гармонической вибрации определённой частоты и амплитуды на испытываемую аппаратуру.

В программе испытаний необходимо указывать время выдержки испытываемого прибора в данном режиме. При испытании на виброустойчивость оно должно быть не менее 5 мин, а при испытании на вибропрочность – от 1 до 5 ч при длительном и от 20 до 50 мин – при кратковременном воздействии.

При испытании методом *качающейся частоты вибрации* ее плавно изменяют в заданном диапазоне от нижней до верхней границы и обратно.

В реальных условиях эксплуатации на прибор воздействуют, как правило, не одночастотные синусоидные колебания, а колебания со сложным спектром частот. Поэтому проводят испытание на воздействие *широкополосной случайной вибрации*. В этом случае реализуется одновременное возбуждение всех резонансов испытываемого изделия, что позволяет выявить их взаимное влияние. Ужесточение условий испытаний за счет одновременного возбуждения резонансных частот сокращает время испытаний по сравнению с методом качающейся частоты.

38.2.2. Испытания на ударную прочность и устойчивость

Основная задача испытаний на ударные нагрузки – проверка способности прибора выполнять свои функции во время ударного воздействия и после него. Различают два вида испытаний: на ударную прочность и на ударную устойчивость.

Испытания *на ударную прочность* проводят с целью проверки способности прибора противостоять разрушающему действию механических ударов и после их прекращения выполнять свои функции.

Испытания *на ударную устойчивость* проводят с целью проверки способности приборов выполнять свои функции непосредственно в условиях действия механических ударов. При этом испытываемую аппаратуру подвергают воздействию многократных или одиночных ударов. Характеристики режимов испытаний (пиковое ударное ускорение и число ударов) задаются в соответствии со степенью жесткости испытаний.

Частота следования ударов должна обеспечивать возможность контроля проверяемых параметров. В качестве проверяемых выбирают параметры, по изменению которых можно судить об ударной устойчивости прибора в целом (например, искажение выходного сигнала, стабильность

характеристик функционирования и т. д.). Ударную прочность оценивают по степени целостности конструкции (например, образование трещин, отсутствие контакта и т. д.). Прибор считают выдержавшими испытания, если в процессе и (или) после испытания он удовлетворяет требованиям стандартов и ТУ.

Испытания на ударные нагрузки проводят на специальных ударных стендах, а в некоторых случаях ударное воздействие воспроизводят на вибростендах. При этом пиковое ударное ускорение и число ударов, а также форму ударного импульса и его длительность назначают в соответствии с ТУ на конкретное изделие.

В зависимости от принципа создания ударного воздействия все ударные стенды разделяют на два основных вида:

1) стенды, действие которых основано на принципе торможения предварительно разгоняемого до требуемой скорости тела;

2) стенды, действие которых основано на принципе разгона тела до требуемой скорости.

В практике испытаний первый вид ударных стендов получил наибольшее распространение. Основными узлами такой ударной установки являются подвижная ударная платформа (стол), тормозное устройство, основание (наковальня) и направляющие.

Некоторые оптические приборы требуется подвергать испытаниям на транспортирование и на износ. Первые из этих испытаний проводят на стендах для транспортной тряски или непосредственным транспортированием изделий, упакованных в тарных ящиках, на автомобиле при его движении по булыжным и проселочным дорогам со скоростью 20–40 км/ч на расстояние до 1000 км. Для второго вида испытаний существуют специальные стенды.

38.2.3. Испытания на воздействие линейных нагрузок

Испытания на воздействие линейных нагрузок проводят с целью проверки способности приборов выполнять свои функции при линейных нагрузках и разрушающем действии этих нагрузок.

Испытания обычно проводят при отключенной аппаратуре прибора. Если прибор испытывается во включенном состоянии, необходимо выбрать такие параметры, по изменению которых можно судить об устойчивости к воздействию линейного ускорения в целом (например, целостность электрической сети, искажение выходного сигнала и т. д.). Режим программы испытаний определяется значением линейного ускорения. При испытании с ускорением до 5000 м/с^2 продолжительность испытания – 3 мин, а при ускорении свыше 5000 м/с^2 – 1 мин.

Испытания на воздействие линейных ускорений производятся на специальных установках – центрифугах, создающих в горизонтальной плоскости радиально направленные ускорения. Центрифуги классифицируются

по типу привода, конструкции, грузоподъёмности, величине максимального линейного ускорения.

По типу привода различают центрифуги с электрическим, гидравлическим и комбинированным приводами. По конструкции различают центрифуги с поворотными и неповоротными столами и с изменяющимся радиусом вращения изделия. В зависимости от грузоподъёмности центрифуги квалифицируются на малые (до 10 кг), средние (до 50 кг) и тяжелые (до 100 кг). По величине максимально воспроизводимого ускорения центрифуги разделяют на категории: А – до 250 м/с^2 , Б – до 250 м/с^2 , В – до 1000 м/с^2 , Г – до 2000 м/с^2 , Д – свыше 2000 м/с^2 .

38.2.4. Испытания на воздействие акустического шума

Испытания проводят с целью определения способности приборов выполнять свои функции, сохраняя параметры в пределах норм, указанных в стандартах и ТУ на изделия и программе испытаний в условиях воздействия повышенного акустического шума.

В отличие от других видов внешних воздействий у акустических нагрузок есть особенности:

широкий спектр частот, изменяющийся от единиц герц до нескольких килогерц;

случайный характер изменения этих частот во времени и пространстве;

распределенный характер воздействия, зависящий не только от уровня звукового давления, но и от площадки прибора.

Резонансные явления элементов аппаратуры, возникающие в результате воздействия акустического шума, чаще всего проявляются на частотах 1500–2000 Гц.

Для испытания приборов на воздействие акустического шума применяют следующие методы:

1) воздействие на изделие *случайного акустического шума*;

2) воздействие *тока меняющейся частоты*.

Режим испытаний указанных методов устанавливается заданием величины звукового давления для соответствующей степени жесткости.

Испытания первым методом проводят путем воздействия акустического шума в диапазоне частот 125–10000 Гц с одновременным воздействием на изделие заданного равномерного звукового давления определенного спектра частот. Продолжительность воздействия звукового давления должна быть 5 мин, если большее время не требуется для контроля и (или) измерения параметров изделий. При испытаниях необходимо обнаруживать у приборов резонансные частоты и проводить контроль параметров изделий на этих частотах. Рекомендуется выбирать параметры, по изменению которых можно судить об устойчивости к воздействию акустического шума прибора в целом (например, искажение выходного сигнала или из-

менение его значения, целостность электрической цепи, изменение контактного сопротивления и т. д.).

Испытания вторым методом проводят путем воздействия тока меняющейся частоты в том же диапазоне при плавном ее изменении по всему диапазону от низшей к высшей и обратно (один цикл). Испытания проводят в течение 30 мин, если большее время не требуется для контроля параметров приборов. При регистрации параметров изделия определяют их изменения в функции частоты акустического воздействия.

Испытания приборов на воздействие акустического шума проводят на открытом стенде, в закрытых блоках с натурным источником шума и в акустических камерах. На открытом стенде испытывают крупногабаритные приборы. Требуемые уровни нагрузок в данном случае достигаются выбором положения испытываемого прибора относительно источника шума. Испытания в закрытых блоках проводят на более высоких уровнях акустической нагрузки, при этом происходит некоторое искажение звукового поля по сравнению с естественными условиями эксплуатации.

Для испытаний используются реверберационные акустические камеры в виде неправильного пятиугольника с размерами, указанными на рис. 38.1.

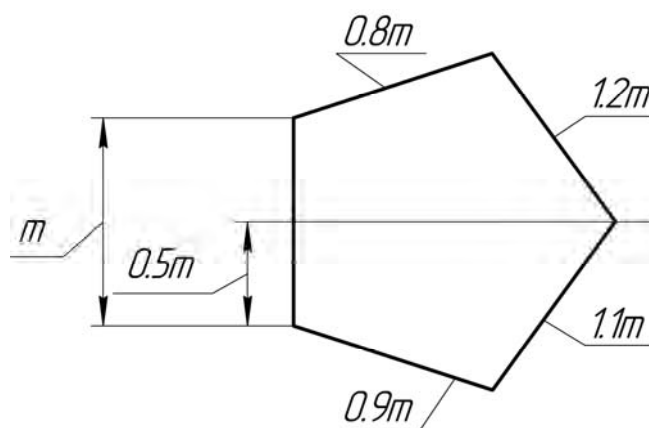


Рис. 38.1. Размеры камеры для акустических испытаний

Значение m должно превышать наибольшие габаритные размеры прибора не менее чем в два раза. В качестве звуковых источников используют сирены высокой мощности или мощные громкоговорители.

38.3. Климатические испытания

38.3.1. Температурные испытания

Испытания на устойчивость к *повышенной температуре* проводят с целью определения способности прибора сохранять свои параметры и внешний вид в пределах норм ТУ в процессе и после воздействия верхнего значения температуры.

Различают два метода испытаний приборов на воздействие повышенной температуры:

- 1) испытание под термической нагрузкой;
- 2) испытание под совмещенной термической и электрической нагрузками.

Первому методу испытаний подвергаются нетеплорассеивающие изделия, температура которых в процессе эксплуатации зависит только от температуры окружающей среды, второму – теплорассеивающие приборы, которые в рабочем состоянии нагреваются за счет выделяемой мощности под действием электрической нагрузки.

При испытании под совмещенной нагрузкой прибор помещают в камеру и испытывают под нормальной или максимально допустимой для данных приборов электрической нагрузкой, соответствующей верхнему значению температуры внешней среды, устанавливаемой в зависимости от степени жесткости испытаний.

Возможны два способа проведения испытаний теплорассеивающих приборов. При *первом способе* достижение заданного температурного режима приборов определяют контролем температуры воздуха в камере, которая устанавливается равной верхнему значению температуры окружающей среды при эксплуатации (указанной в ТУ). При *втором способе* достижение заданного температурного режима приборов определяют контролем температуры его узла, который имеет наибольшую температуру или является наиболее критичным для работоспособности изделия.

Испытание первым способом возможно, когда объём камеры достаточно велик. Для имитации свободного обмена воздуха в камере отсутствует принудительная циркуляция воздуха, или её охлаждающим действием можно пренебречь. В остальных случаях испытание теплорассеивающих изделий следует проводить вторым способом. Измерение параметров испытуемых приборов производят после достижения теплового равновесия без извлечения их из камеры. Для проведения измерения прибор подключают к наружным коммутационным цепям измерительной системы. Если измерение параметров без извлечения из камеры технически невозможно, то для измерения допускается изъятие прибора из камеры. Однако время измерения не должно превышать 3 мин, если другое значение времени не оговорено в ТУ.

Для испытаний устойчивости к повышенным температурам применяют специальные *камеры тепла*, которые в случае необходимости должны обеспечивать подачу электрической нагрузки и измерение параметров критериев годности прибора в процессе испытаний.

Испытание на устойчивость к *пониженной температуре* проводят с целью проверки параметров приборов в условиях воздействия низкой температуры внешней среды, а также после пребывания их в этих условиях. Приборы помещают в камеру холода, после чего по ТУ устанавливают нижнее значение.

Время выдержки при заданной температуре выбирают в зависимости от установленной жесткости испытаний из временного ряда значений, приведенных в ТУ. Производятся измерения тех же параметров, что и при испытании на воздействие повышенных температур.

Испытания проводят в *камерах холода*. Температура стенок камеры после достижения температурной стабильности не должна отличаться от температуры испытания более чем на 8 %.

Испытание на *циклическое воздействие смены температур* проводят для определения способности приборов противостоять быстрой смене температуры. В процессе этого испытания приборы подвергают воздействию быстрой смены верхнего и нижнего значений температур. Для испытания устанавливают три цикла, если другое число циклов специально не оговорено.

Каждый цикл состоит из двух этапов. Сначала приборы помещают в камеру холода, а затем в камеру тепла, температуры в которых устанавливают в зависимости от степени жесткости испытания. При заданных температурах приборы выдерживают в течение времени, необходимого для достижения теплового равновесия. Время переноса изделий из камеры тепла в камеру холода или обратно не должно превышать 5 мин. При этом рекомендуется, чтобы время достижения заданного температурного режима в камерах после загрузки изделий также не превышало этого значения.

Во время испытания прибор отключен, а его параметры измеряют до и после испытания, предварительно выдержав изделие в нормальных климатических условиях.

Одним из самых жестких видов климатических испытаний является термоциклирование, которое позволяет выявить скрытые конструктивные дефекты и дефекты в технологии, допущенные при изготовлении приборов.

Оборудование для испытаний изделий на циклическое воздействие температур представляет собой две или три совмещенные камеры, в которых поддерживаются различные температурные режимы. Приборы размещают на специальном транспортном устройстве, которое автоматически перемещает его из камеры в камеру.

Прибор считается выдержавшим испытание на устойчивость к нагреванию:

если в нагретом состоянии все механизмы прибора действуют исправно, а ошибки показаний и величины мертвого хода не выходят за пределы допусков;

не обнаружено расклейки оптических деталей, вытекания смазки и уплотняющей замазки, отслаивания лака, отпотевания внутренних деталей и расстройств оптической системы;

после приведения температуры испытуемого прибора к комнатной (25 ± 10 °С) в технических характеристиках прибора не обнаружено отклонений, превышающих допусковые ТУ, а также на внутренних поверхностях не выявлено отпотевания и порчи наружной отделки.

Ухудшение качества изображения оптической системы свидетельствует о наличии натяжений в оптических деталях. Нарушение плавности хода, увеличение люфтов, уменьшение крутящих моментов на рукоятках поворотных механизмов свидетельствуют о неправильном выборе зазоров.

Отпотевание оптических деталей при нагреве объясняется проникновением влаги внутрь прибора. В этих случаях узел, в котором обнаружена неисправность, необходимо разобрать; полости, где выявлена влага, следует промыть, просушить, вновь собрать и герметизировать прибор.

Прибор считается выдержавшим испытания на охлаждение, если при пониженной температуре:

все механизмы работают исправно, но усилия, необходимые для приведения их в действие, стали несколько большими, чем при комнатной температуре;

ошибки измерений отсчетными механизмами и ошибки мертвого хода не превышают допусков;

на оптических деталях не обнаружено расклейки, а на их поверхностях – инея, осыпки лака и герметика.

После нахождения в камере влажности внутри прибора не должно быть заметно следов влаги и отпотевания, а на наружной поверхности – порчи отделки.

38.3.2. Испытания на влагоустойчивость

Различают два вида испытаний на влагоустойчивость: длительное и кратковременное. *Длительное* проводится с целью определения способности приборов сохранять свои параметры в условиях и после длительного воздействия влажности. *Кратковременное* проводится с целью оперативного выявления грубых технологических дефектов в серийном производстве и дефектов, которые могли возникнуть на предшествующих испытаниях.

Оба вида испытаний на влагоустойчивость могут проводиться в непрерывном (без конденсации влаги) или циклическом (с конденсацией влаги) режимах. Конкретный метод испытания устанавливается в зависимости от назначения и условий эксплуатации приборов.

В *непрерывном* режиме испытаний не предусматривается конденсации влаги на приборах, поэтому эти испытания проводят при постоянных значениях температуры и влажности в камере. Приборы помещают в камеру влажности и выдерживают при заданной температуре, указанной в ТУ. Время выдержки приборов при заданной температуре определяется необходимостью достижения прибором теплового равновесия. Затем относительную влажность воздуха в камере повышают до $(95\pm 3)\%$ и далее поддерживают ее и температуру постоянными в течение всего времени испытания.

Методика проведения кратковременных испытаний изделий при непрерывном режиме аналогична методике испытаний в циклическом режиме. Продолжительность испытаний составляет 2, 4, 6 или 10 сут и устанавливается в ТУ.

Время выдержки изделий в нормальных условиях после окончания кратковременных испытаний обычно составляет 2–4 ч, в то время как по окончании длительных испытаний это время должно быть не менее 24 ч.

Испытание изделий под электрической нагрузкой предусматривают в том случае, если в условиях эксплуатации у этих изделий при увлажнении под напряжением возможно появление разрушающих действий электролиза или электрохимической коррозии. В виде нагрузки используется напряжение, обеспечивающее минимальное выделение тепла в испытываемых изделиях. В большинстве случаев испытания на влагоустойчивость проводят без электрической нагрузки.

Измерения параметров и другие проверки приборов проводят, как правило, в конце испытания (при циклическом режиме – на последнем цикле, в конце последнего часа выдержки при верхнем значении температуры) без извлечения изделий из камеры влажности.

Циклический режим испытаний характеризуется воздействием повышенной влажности при циклическом изменении температуры воздуха в камере. В результате создаются условия для выпадения росы на наружных поверхностях приборов (при быстром снижении температуры) и последующего ее испарения (в период повышения температуры), что способствует интенсивному развитию процессов коррозии.

Испытание на влагоустойчивость проводят в специальных камерах тепла и влаги. Существуют различные испытательные установки, отличающиеся габаритными размерами, точностью поддержания режима, диапазоном характеристик. Так, камеры, предназначенные для воспроизведения постоянного (непрерывного) режима испытаний, должны осуществлять поддержание режима испытаний в полезном объеме в пределах 3 % нормированного значения влажности и ± 2 °С нормированного значения температуры.

38.3.3. Испытания на воздействие солнечного излучения

Испытания на воздействие солнечного излучения проводят с целью проверки сохранения внешнего вида и параметров приборов после воздействия солнечного излучения. Данному виду испытаний подвергаются приборы или применяемые в них конструктивные элементы и покрытия, выполненные из органических материалов, которые не подвергались другим видам испытаний.

Испытания проводят в *камере солнечной радиации*. Испытуемое изделие располагают в камере таким образом, чтобы наиболее уязвимые детали (изготовленные из органических материалов или имеющие органические покрытия) были обращены к источникам излучения. После испытаний делают визуальный осмотр этих деталей (узлов) и контролируют только те параметры приборов, стабильность которых зависит от состояния деталей и узлов, изготовленных из органических материалов или имеющих органические покрытия и подвергающихся непосредственному облучению.

Испытуемую аппаратуру или ее детали (кожухи, крышки, шкалы и т. д.) облучают источником света, излучение которого по спектральному составу и интенсивности близко к солнечному. Спектр ультрафиолетового излучения должен лежать в пределах 280–400 нм.

38.3.4. Испытания на воздействие пыли

Испытания на воздействие пыли подразделяются на *динамические* и *статические*. Целью первого вида испытаний является проверка устойчивости приборов к разрушающему (абразивному) воздействию пыли. Второй вид испытаний проводят с целью проверки способности приборов работать в среде с повышенной концентрацией пыли. В обоих случаях прибор помещают в камеру пыли и располагают так, чтобы воздействие пыли было наиболее эффективным и соответствовало возможному ее воздействию при эксплуатации.

Испытание проводят обдуванием приборов в течение 2 ч. Затем вентилятор отключают, и в течение 2 ч происходит оседание пыли без циркуляции воздуха. При испытании на пыленепроницаемость в случае использования флюоресцирующего порошка для выявления пыли, проникающей внутрь изделий, их переносят в затемненное помещение, вскрывают и подвергают ультрафиолетовому облучению.

Приборы считают выдержавшими испытания, если в процессе и (или) после испытания они удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах и ТУ на изделия и программе для данного вида испытаний.

В случае проверки устойчивости к абразивному действию пыли приборы считают выдержавшими испытания, если их внешний вид удовлетворяет требованиям, оговоренным в стандартах и ТУ на изделия.

В случае проверки пыленепроницаемости браковочным признаком служит наличие пыли, проникшей внутрь изделия.

38.3.5. Испытания на воздействие соляного тумана

Испытания на воздействие соляного тумана проводят с целью определения коррозионной стойкости приборов в атмосфере, содержащей водные растворы солей.

Приборы помещают в камеру и располагают так, чтобы в процессе испытания брызги раствора соли из пульверизатора или аэрозольного аппарата, а также капли с потолка, стен и системы подвесов не попадали на приборы. Температура в камере устанавливается 27 ± 2 °С, приборы подвергаются воздействию соляного тумана, создаваемого распылением раствора соли, который приготавливают путем растворения в дистиллированной воде 33 ± 3 г/л хлористого натрия.

Распыление раствора производят с помощью пульверизатора или центрифуги аэрозольного аппарата в течение 15 мин каждого часа испытания.

Общее время испытания составляет 2, 7 или 10 сут и оговаривается в ТУ в зависимости от степени жесткости. Время испытания изделия отсчитывают с момента выхода камеры на испытательный режим. По окончании испытания изделия промывают в дистиллированной воде, если это указано в стандартах, после чего просушивают.

Изделия считают выдержавшими испытание, если они по внешнему виду удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах для данного вида испытаний.

Камера соляного тумана должна обеспечивать надежность испытания в заданном режиме с автоматическим введением раствора соли в объем камеры. Туман, полученный в камере, должен обладать дисперсностью 1–10 мкм (95 % капель) и концентрацией воды 2–3 г/м³.

38.3.6. Испытания на воздействие атмосферного, статического гидравлического давления и на водопроницаемость

Испытания на воздействие *пониженного атмосферного давления* проводят с целью проверки способности прибора выполнять свои функции в условиях ухудшения теплоотдачи и возможности перегрева.

Испытания на воздействие пониженного атмосферного давления проводят либо при нормальной температуре, либо при верхнем значении температуры для испытываемых приборов, записанных в стандартах.

Испытанию при нормальной температуре подвергаются приборы, нагревающиеся при эксплуатации или не подверженные влиянию пониженного атмосферного давления. Испытанию при верхнем значении температуры подвергаются приборы, для которых нагрев при нагрузке, нормированной для пониженного атмосферного давления, является критическим. В этом случае прибор испытывается под нагрузкой, вид и характер которой оговариваются в ТУ.

Испытание на воздействие *повышенного давления* воздуха или другого газа проводят в барокамерах с целью проверки устойчивости параметров и сохранения внешнего вида изделий в условиях повышенного атмосферного давления.

Изменения атмосферного давления и температуры оказывают влияние на показатель преломления стекла и воздушные промежутки между линзами. Отклонение этих показателей приводит к изменению фокусного расстояния объектива и, следовательно, вызывает расфокусировку прибора.

Изменение оптических характеристик приборов при воздействии на них пониженного атмосферного давления и изменяющейся температуры проверяют при термобарических испытаниях. Эти испытания проводят в специальных термобарокамерах.

Термобарическую расфокусировку объектива испытываемого прибора определяют путем измерений величины его фокуса при нормальных, а затем при измененных термобарических условиях. Разность отсчетов дает величину расфокусировки прибора.

Для фокусировки объектива во время эксплуатации прибора применяют специальные устройства – компенсаторы (механические и опико-электронные).

Целью испытаний на воздействие *статического гидравлического давления* является определение работоспособности аппаратуры в условиях пребывания под водой. Испытания на водонепроницаемость проводят с целью проверки сохранения параметров аппаратуры после ее пребывания в воде.

Испытание прибора на воздействие статического гидравлического давления проводят, помещая его в бак с водой, где создается давление, соответствующее предельной глубине погружения, установленной стандартами и ТУ. Испытание проводят в два этапа: сначала в течение 15 мин аппаратуру выдерживают при давлении, на 50 % большем давления предельной глубины погружения, затем после снижения давления до нормального его снова повышают до значения, уже соответствующего предельной глубине погружения, и в этих условиях аппаратуру выдерживают в течение 24 ч. По окончании испытаний давление снижают до нормального и, не извлекая прибор из воды, проводят измерение выходных параметров, указанных в ТУ и программе испытания. Изделия считают выдержавшими испытания на воздействие статического гидравлического давления, если в процессе и после испытаний они удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах и ТУ на изделия и в программе испытаний.

Испытания на водонепроницаемость проводят, погружая аппаратуру в нерабочем состоянии на 1 ч в ванну с водой. Глубина погружения от поверхности воды до верхней точки конструкции аппаратуры должна быть 50 см, температура воды 20 ± 10 °С. Внешний осмотр и измерение параметров аппаратуры проводят после извлечения ее из ванны и удаления воды с поверхности.

38.4. Биологические и космические испытания

38.4.1. Испытания на биостойкость

Испытания на биостойкость (биоустойчивость) проводят с целью определения способности приборов в условиях воздействия на них биологических факторов сохранять значения показателей в пределах, установленных научно-технической документацией (НТД). В настоящее время государственными стандартами регламентируется учет следующих биофакторов: плесневых грибов, насекомых, грызунов и почвенных микроорганизмов. Наибольшее разрушение приборов возникает под действием грибковой плесени.

Грибостойкостью называют способность приборов противостоять развитию и разрушающему действию грибковой плесени в среде, зараженной плесневыми грибами. Испытания приборов на грибоустойчивость проводят на образцах, которые не подвергались климатическим и механическим испытаниям. В качестве образцов допускается использовать изделия,

забракованные по электрическим параметрам. Число образцов устанавливается в соответствии с НТД или программой испытания. Для испытания на грибоустойкость выбраны такие виды плесневых грибов, которые широко распространены, быстро растут, имеют высокую стойкость к фунгицидам (противогрибковым препаратам) и способны наносить наибольший вред приборам. Для испытаний на грибоустойчивость используют следующее оборудование: камеры грибообразования, обеспечивающие температуру нагрева 29 ± 2 °С и относительную влажность в рабочем объеме более 90 %; эксикаторы; сушильные шкафы; автоклавы, биологические микроскопы; пульверизаторы; пробирки и т. д.

Существуют два метода испытаний. По первому из них образцы приборов, отобранные для испытаний, тщательно очищают от загрязнений этиловым спиртом. По второму методу выборку изделий делят на две равные части (число изделий в выборке должно быть четным). Для выявления причин поражения изделий грибами подвергают очистке от загрязнений этиловым спиртом только первую группу образцов. Таким образом, первый метод устанавливает, содержат ли изделия и материалы источники питания для развития и роста грибов, второй выявляет наличие фунгицидных свойств и влияние внешних загрязнений на грибоустойчивость приборов.

По окончании испытаний образцы извлекают из камеры и осматривают сначала невооруженным глазом в рассеянном свете при освещенности от 2000 до 3000 лк, а затем при увеличении в $(56-60)^{\times}$. Оценку грибоустойчивости изделий производят по росту грибов на образцах по шестибалльной системе:

при осмотре под микроскопом рост плесневых грибов не виден – балл 0;
осмотре под микроскопом видны проросшие споры и незначительно развитый мицелий в виде неветвящихся гиф – 1;

осмотре под микроскопом виден мицелий в виде ветвящихся гиф, возможно наличие спор – 2;

осмотре невооруженным глазом рост грибов едва виден, но отчетливо виден под микроскопом – 3;

осмотре невооруженным взглядом отчетливо виден рост грибов, покрывающих менее 25 % испытываемой поверхности, – 4;

осмотре невооруженным глазом отчетливо виден рост грибов, покрывающих более 25 % испытываемой поверхности, – 5.

Изделия считают выдержавшими испытание по первому методу, если рост грибов на них не превышает балл 2. Результаты испытания изделий на грибоустойчивость по второму методу оценивают по обеим группам образцов и считают положительными, если оценка роста грибов на образцах первой группы не превышает балл 2, а у второй группы – балл 3. Затем составляют протокол испытаний, куда заносят результаты. Грибоустойчивость обозначают буквами ПГ (плесневые грибы) с трехзначным или двузначным числовым индексом, фиксирующим баллы, полученные при испытаниях по разным методам.

При проведении испытаний требуется соблюдать меры безопасности. Испытания на грибоустойчивость разрешается проводить лицам, прошедшим предварительный медицинский осмотр, обучение и инструктаж по технике безопасности, так как при испытаниях используются условно-патогенные грибы. Спецодежду, оборудование, помещение, все приборы, приспособления и инструменты систематически дезинфицируют.

Образцы по окончании испытаний дезинфицируют в автоклаве при давлении 0,1 МПа и температуре 121 °С в течение 1 ч или промывают (протирают) 5%-м раствором фенола (или формальдегида) или 10%-м раствором перекиси водорода. Оптические детали протирают спиртом. Недорогие образцы уничтожают.

38.4.2. Испытания на воздействие ультранизких давлений и криогенных температур

Испытания на устойчивость к воздействию ультранизких давлений проводят для определения способности приборов при ультранизких давлениях сохранять свои параметры в пределах, указанных в НТД, для изучения и оценки воздействия глубокого вакуума на материалы и элементы приборов, а также для проверки принятых схемных и конструктивно-технологических решений.

Воздействия космического вакуума условно можно разделить на механические, тепло- и электрофизические, а также поверхностные. При этом для тепло- и электрофизических воздействий критичны концентрации частиц в объеме, а для поверхностных – потоки частиц к поверхностям (или от них). Последние обязательно требуют создания глубокого вакуума.

Для механических воздействий общим условием является перепад давлений $\Delta p \approx 1,33 \cdot 10^5$ Па и, следовательно, испытания в вакууме не обязательны (например, $p_1 = 2,66 \cdot 10^5$ Па; $p_2 = 1,33 \cdot 10^5$ Па; $\Delta p = p_1 - p_2 = 1,33 \cdot 10^5$ Па). Для остальных воздействий в качестве общего условия можно рассматривать отсутствие столкновения частиц в объеме.

Материалы, узлы, элементы, а также приборы и космический аппарат в целом подвергаются испытаниям в вакуумных установках.

Испытания приборов на воздействие криогенных температур проводят с целью оценки устойчивости их параметров при криогенных температурах и реализуют при помощи криотермовакuumных испытательных установок с многоступенчатой откачной системой.

38.4.3. Испытания на воздействие ионизирующих излучений

Испытания материалов приборов на воздействие ионизирующих излучений производят с целью проверки работоспособности и сохранения внешнего вида изделий в пределах, установленных в НТД (требования ТЗ и ТУ).

Компоненты приборов, подвергнутые воздействию радиоактивных излучений, характерных для эксплуатационных условий, могут изменять свои параметры. Поскольку радиоактивные излучения, проникая в толщу материала, вызывают в нем ионизацию, они называются *ионизирующими*.

Радиоактивные излучения подразделяются на корпускулярные и квантовые. Первые представляют собой потоки быстрых элементарных частиц (нейтронов, протонов, ядер атомов химических элементов, бета-, альфа- и других частиц), вторые – электромагнитные ионизирующие излучения (гамма- и рентгеновское).

Для измерения поглощенной дозы радиоактивного излучения применяется специальная единица – грей. Один грей (1 Гр) равен дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передаётся энергия любого ионизирующего излучения 1 Дж.

Количество энергии, излучаемое источником в единицу времени, называется *мощностью* источника излучения. Мощность источника излучения равна произведению выхода элементарных частиц (квантов) источника на их энергию и измеряется в единицах энергии на единицу времени, например, джоуль в секунду (Дж/с) или, что то же самое, ватт (Вт).

В качестве источников радиоактивного излучения в лабораторных условиях применяют ускорители заряженных частиц и ядерные реакторы.

Литература к разделу 4

1. Акаев, А. А. Оптические методы обработки информации / А. А. Акаев, С. А. Майоров. – М. : Высшая школа, 1988. – 237 с.
2. Афанасьев, В. А. Оптические измерения / В. А. Афанасьев. – М. : Высшая школа, 1981. – 229 с.
3. Бардин, А. Н. Сборка и юстировка оптических приборов / А. Н. Бардин. – М. : Высшая школа, 1968. – 325 с.
4. Войчинский, А. М. Технологичность изделий в машиностроении / А. М. Войчинский, Э. Ж. Янсон. – Л. : Машиностроение, 1988. – 231 с.
5. Воронин, Ю. В. Контроль измерительных приборов и специального инструмента / Ю. В. Воронин, А. А. Рубцов. – М. : Машиностроение, 1981. – 199 с.
6. Гвоздева, Н. П. Прикладная оптика и оптические измерения / Н. П. Гвоздева, К. К. Коркина. – М. : Машиностроение, 1975. – 383 с.
7. Гвоздева, Н. П. Прикладная оптика и оптические измерения / Н. П. Гвоздева, К. К. Коркина. – М. : Машиностроение, 1981. – 384 с.
8. Гришин, Б. С. Юстировка сложных оптических систем / Б. С. Гришин. – М. : Машиностроение, 1976. – 205 с.
9. Гуторов, М. М. Сборник задач по основам светотехники / М. М. Гуторов. – М. : Энергия, 1966. – 176 с.
10. Данилевич, Ф. М. Сборка и юстировка оптических контрольно-измерительных приборов / Ф. М. Данилевич, В. А. Никитин, Е. П. Смирнова. – Л. : Машиностроение, 1976. – 255 с.

11. Джадд, Д. Цвет в науке и технике / Д. Джадд, Г. Вышецки. – М. : Мир, 1978. – 592 с.
12. Дудников, Ю. А. Растровые системы для получения объемных изображений / Ю. А. Дудников, В. К. Рожков. – Л. : Машиностроение, 1986. – 216 с.
13. Ельников, Т. Н. Сборка и юстировка оптико-механических приборов / Т. Н. Ельников, А. Ф. Дитев, И. К. Юрусов. – М. : Машиностроение, 1974. – 351 с.
14. Автоматическая стабилизация оптического изображения / Д. Н. Еськов [и др.]. – Л. : Машиностроение, 1988. – 240 с.
15. Сборка оптических приборов / А. А. Ефремов [и др.]. – М. : Высшая школа, 1983. – 319 с.
16. Котлецов, Б. Н. Микроизображения. Оптические методы получения и контроля / Б. Н. Котлецов. – Л. : Машиностроение, 1985. – 239 с.
17. Оптико-механические приборы / С. В. Кулагин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1984. – 350 с.
18. Латыев, С. М. Компенсация погрешностей в оптических приборах / С. М. Латыев. – Л. : Машиностроение, 1985. – 248 с.
19. Лопухин, В. А. Автоматизация визуального технологического контроля в электронном приборостроении / В. А. Лопухин, А. С. Гурелев. – Л. : Машиностроение, 1987. – 287 с.
20. Оптико-механические приборы для научных исследований / Л. А. Новицкий [и др.]. – М. : Машиностроение, 1986. – 432 с.
21. Оптические приборы в машиностроении : справочник. – М. : Машиностроение, 1974. – 238 с.
22. Петров, В. П. Контроль качества и испытание оптических приборов / В. П. Петров. – Л. : Машиностроение, 1985. – 222 с.
23. Погарев, Г. В. Юстировка оптических приборов / Г. В. Погарев. – Л. : Машиностроение, 1982. – 237 с.
24. Погарев, Г. В. Оптические юстировочные задачи / Г. В. Погарев, Н. Г. Киселев. – Л. : Машиностроение, 1989. – 260 с.
25. Проектирование оптических систем / под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. – М. : Мир, 1983. – 430 с.
26. Русинов, М. М. Юстировка оптических приборов / М. М. Русинов. – М. : Недра, 1969. – 326 с.
27. Сокольский, М. Н. Допуски и качество оптического изображения / М. Н. Сокольский. – Л. : Машиностроение, 1989. – 221 с.
28. Фатыхова, Р. К. Контроль оптико-механических приборов / Р. К. Фатыхова, Р. В. Фатыхов, Э. А. Кравцов. – М. : Машиностроение, 1988. – 229 с.
29. Шульман, М. Я. Автоматическая фокусировка оптических систем / М. Я. Шульман. – Л. : Машиностроение, 1990. – 224 с.
30. Эрвайс, А. В. Юстировка и ремонт оптико-механических измерительных приборов / А. В. Эрвайс. – М. : Машгиз, 1958. – 459 с.

Раздел 5

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Глава 39. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИБОРОВ

39.1. Общие сведения

Под *эксплуатацией приборов* понимается комплекс мероприятий по поддержанию их работоспособности для эффективного применения по назначению за все время от изготовления до списания. Эксплуатация предполагает активный процесс управления состоянием приборов в соответствии с требованиями эксплуатационной и ремонтной документации. Высокое качество эксплуатации приборов достигается:

глубокими знаниями и выполнением обслуживающим персоналом правил применения и технического обслуживания, установленных в нормативно-технических документах по метрологическому обеспечению и эксплуатационной документации на используемые приборы;

правильной организацией технического обслуживания и качественным его проведением;

своевременным представлением на поверку и ремонт;

правильной организацией и соблюдением правил хранения;

правильным ведением учётной и эксплуатационной документации;

своевременным и правильным проведением рекламационных работ;

своевременным проведением категорирования и списания;

систематическим контролем за правильной эксплуатацией и своевременным устранением выявленных недостатков.

39.2. Техническое обслуживание

Основой поддержания приборов в исправном состоянии и постоянной готовности к применению по назначению является *техническое обслуживание*, которое предназначено для предупреждения и устранения отказов и неисправностей при их использовании, хранении и транспортировании, поддержания параметров в заданных пределах.

Периодичность, объём и порядок проведения технического обслуживания приборов, применяемых автономно, определяется эксплуатационной документацией на эти приборы, а приборов, встроенных в технические устройства, – эксплуатационной документацией на эти устройства.

Различают техническое обслуживание по установленному регламенту или в соответствии с текущим состоянием. В зависимости от объема работ техническое обслуживание по регламенту может подразделяться на ежедневное, еженедельное, ежемесячное, полугодичное, годовое. Ежедневное техническое обслуживание осуществляется только для применяемых в дан-

ный день приборов. При проведении технического обслуживания не допускается нарушение пломб, оттисков клейм, если это не предусмотрено эксплуатационными документами.

Все неисправности приборов, выявленные в процессе технического обслуживания, должны быть устранены. Последующие операции запрещается выполнять до устранения обнаруженных неисправностей. Приборы с неустраненными неисправностями бракуются и направляются в ремонт.

39.3. Периодичность поверки

Для поддержания приборов в исправном состоянии в процессе эксплуатации осуществляется их периодическая поверка, которая проводится через определенные межповерочные интервалы, установленные для обеспечения исправности приборов на период между поверками.

Для приборов, подлежащих обязательной государственной поверке, межповерочные интервалы устанавливаются непосредственно Госстандартом или органами государственной метрологической службы. Для приборов, подлежащих ведомственной поверке, периодичность поверки устанавливается главными метрологами или руководителями ведомственных метрологических служб предприятий, на которые возложены обязанности главных метрологов.

Длительность межповерочных интервалов выбирается от фактической надёжности приборов, условий эксплуатации, интенсивности их использования, а также от значимости для потребителя результатов измерений. В настоящее время при установлении длительности межповерочного интервала используются в основном три подхода: экономический, технико-эксплуатационный и смешанный.

При *экономическом* подходе длительность межповерочного интервала определяется из условий минимизации экономических затрат, связанных с обслуживанием и применением неисправных приборов. Этот подход может быть использован тогда, когда без особых затруднений можно получить сведения о затратах, обусловленных применением неработоспособных приборов.

Наибольшее распространение получил *технико-эксплуатационный* подход, который основан на задании и обеспечении допустимого значения показателя состояния прибора.

Смешанный подход к назначению длительности межповерочного интервала заключается в использовании результатов оценки межповерочных интервалов, полученных на основании экономического и технико-эксплуатационного подходов.

39.4. Транспортирование

В процессе эксплуатации приборы подвергаются транспортированию, что объясняется необходимостью их периодической поверки, ремонта,

а также сменой места применения. Встроенные приборы транспортируются вместе с техническими устройствами. Транспортирование приборов сопряжено с воздействием на них многих внешних факторов, характеристики которых иногда выходят за пределы рабочих условий эксплуатации. Такими в первую очередь являются удары, повышенная влажность, пыль, пониженное атмосферное давление и др. Их воздействие может в значительной степени снизить надёжность и даже привести к потере трудоспособности прибора. Чтобы предотвратить нежелательные последствия транспортирования, применяется ряд мер по обеспечению сохранности приборов.

Для транспортирования приборов применяется штатная упаковка, надёжно защищающая от пыли, влаги, ударов, перемещений и тряски. При ее отсутствии используется другая тара, обеспечивающая сохранность приборов. При транспортировании образцовых приборов применяются дополнительные меры, обеспечивающие их сохранность, например, специальные транспортировочные ящики, внутри которых имеются амортизаторы. Зазоры между ящиками плотно заполняются стружкой, бумагой или другим амортизирующим материалом. При транспортировании самолетом приборы, как правило, размещаются в герметизированных отсеках.

39.5. Хранение

Хранение приборов является одной из задач эксплуатации, заключающейся в том, чтобы приборы, находящиеся длительные сроки в нерабочем состоянии, поддерживались в исправном состоянии. Хранение приборов в исправном состоянии достигается:

- подготовкой к хранению (с применением установленных средств и методов консервации);

- наличием помещений, отвечающих требованиям обеспечения нормальных условий хранения;

- правильным размещением приборов по местам хранения;

- проведением технического обслуживания.

На хранение ставятся исправные, поверенные и полностью укомплектованные эксплуатационной документацией и одиночными комплектами ЗИП приборы. Консервации подлежат приборы, для которых она предусматривается эксплуатационными документами.

Приборы хранятся в отапливаемых помещениях при температуре окружающего воздуха от 10 до 35 °С и относительной влажности не более 80 %, которые соответствуют нормальным условиям хранения. В течение гарантийного срока допускается хранение приборов в упаковке предприятия-изготовителя при температуре от 1 до 40 °С и относительной влажности до 80 %. При этом суточные колебания температуры не должны превышать 5 °С. Для обеспечения этого режима температура и влажность в помещениях постоянно контролируются.

Приборы хранятся отдельно от заполненных электролитом аккумуляторов, кислот, щелочей и материалов, выделяющих химически активные пары и газы; продуктов питания и веществ, подверженных гниению и выделяющих влагу; легковоспламеняющихся жидкостей; горючих материалов. Поступившие на длительное хранение приборы освобождаются от транспортной тары.

Для хранения все приборы следует группировать по типам и классам точности. Приборы с постоянными магнитными или с намагниченными элементами нельзя располагать на стальных стеллажах и вблизи массивных железных и стальных предметов, а также хранить вместе с электроизмерительными приборами других типов.

Источники питания (сухие элементы, батареи) извлекают из приборов, заворачивают в пергаментную бумагу или водонепроницаемую пленку и хранят совместно с приборами. Аккумуляторы, входящие в комплект приборов, за исключением неформованных серебряно-цинковых (не залитых электролитом), хранятся в специальных помещениях.

Особенности хранения отдельных приборов излагаются в инструкциях по их эксплуатации.

Приборы во время хранения подвергаются осмотрам и техническому обслуживанию, которое планируется с учетом установленных сроков поверки и данных, полученных при осмотрах. Обслуживание проводится: по истечении сроков поверки; при нарушении поверительного клейма или утере документов, подтверждающих проведение поверки; нарушении условий хранения и в других случаях, когда возникает сомнение в исправности хранимых приборов.

39.6. Категорирование и списание

Каждый находящийся в эксплуатации прибор в зависимости от степени соответствия его свойств (значений характеристик и параметров) предъявляемым требованиям может быть оценен как пригодный или непригодный, готовый или не готовый к использованию по назначению. Такое заключение принимается на основании информации о свойствах, которые изменяются в процессе эксплуатации приборов и совокупность которых определяет их техническое состояние.

Важным элементом оценки технического состояния прибора является его категорирование, основанное на самой общей оценке степени пригодности к использованию по назначению.

Категория прибора – это условная характеристика, определяемая в зависимости от технического состояния и израсходования ресурса.

Различают четыре категории приборов:

1) новые, не бывшие в использовании и с неистекшими сроками гарантии;

- 2) технически исправные и годные к применению, бывшие в использовании или с истекшими сроками гарантии;
- 3) неисправные, требующие ремонта;
- 4) неисправные, ремонт которых невозможен или нецелесообразен.

Использоваться по назначению могут приборы только первой и второй категорий. Приборы третьей категории ремонтируются только в соответствующих ремонтных органах в зависимости от своего технического состояния. Приборы четвертой категории списываются или переводятся в учебные.

Основанием перевода приборов из одной категории в другую является: истечение срока гарантии;

начало использования по назначению;

заключение соответствующего метрологического или ремонтного органа о возможности дальнейшего использования;

наличие отказов, для устранения которых необходимо проведение ремонта.

Изменение категории оформляется соответствующими документами.

Истечение установленных сроков эксплуатации или выработка ресурса не являются основанием для перевода прибора в четвертую категорию, если по своему техническому состоянию он пригоден для дальнейшего использования. В зависимости от состояния специальная комиссия может назначать дополнительный срок службы. При выходе из строя сменных элементов, предохранителей и др., а также при проведении поверки, регулировки или текущего ремонта в метрологических органах категория прибора не изменяется.

Пригодность прибора к эксплуатации определяется техническим состоянием, экономическими соображениями и моральным износом. Приборы *подлежат списанию* при достижении ими предельного состояния, когда невозможно или по экономическим соображениям нецелесообразно восстановление их работоспособности, а также при моральном устаревании. Если в ремонтном органе установлена невозможность восстановления прибора, он списывается в установленном порядке и используется для восстановления других.

Глава 40. ОПЫТНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПРИБОРОВ

40.1. Общие сведения

Для обеспечения требуемого качества приборов целесообразно проверить их работоспособность в реальных условиях эксплуатации и совместимость с объектом измерения. Особенно это важно для вновь создаваемых приборов при внедрении новых схемно-конструктивных решений. Отсутствие в эксплуатации приборов-аналогов позволяет считать такую проверку обязательной. Эта задача решается при их опытной эксплуатации (ОЭ).

Опытная эксплуатация организуется на местах организации приборов по определенной программе. При этом наряду с использованием приборов по прямому назначению детально исследуется характер изменения их технического состояния со временем, повышается интенсивность использования приборов для быстрее выявления имеющихся недостатков, собираются сведения для оценки тех показателей качества, определение которых затруднено при проектировании и в процессе испытаний.

По результатам проведения ОЭ приборов производится:

оценка степени изменения нормируемых метрологических характеристик во времени;

оценка количественных значений показателей надёжности;

выявление характерных неисправностей и конструктивных недостатков;

оценка ремонтпригодности;

оценка эргономических характеристик;

определение особенностей метрологического обеспечения;

оценка качества эксплуатационной и ремонтной документации;

определение требуемой квалификации обслуживающего персонала.

Полученные данные используются при разработке рекомендаций и предложений по доработке (модернизации) конструкции приборов, установлению рационального объёма и периодичности поверки, повышению уровня ремонтпригодности и оптимизации состава ЗИП, корректировке эксплуатационной и ремонтной документации, подготовке обслуживающего персонала для работы с приборами.

Для отработки приборов к началу серийного производства или на начальном его этапе ОЭ целесообразно проводить на опытных образцах и образцах установочной серии. При планировании значительных объёмов производства приборов возможна ОЭ серийно выпускаемых средств измерений. В то же время в связи с наблюдаемым быстрым моральным износом приборов (после пяти–восьми лет эксплуатации) продолжительность ОЭ, как правило, не должна превышать двух лет.

40.2. Планирование опытной эксплуатации

Планирование ОЭ заключается в выборе номенклатуры приборов, определении мест эксплуатации, установлении объёмов и сроков ее проведения.

Практика показала целесообразность проведения ОЭ на образцах установочной серии практически по всей номенклатуре вновь разрабатываемых приборов. Исключение могут составлять приборы, не претерпевшие существенных схемно-конструктивных изменений по сравнению с эксплуатируемыми в течение длительного времени приборами-аналогами.

В ряде случаев оправдана организация ОЭ приборов, выпускаемых уже длительное время. Это имеет место в том случае, когда по каким-либо причинам не была произведена ОЭ образцов установочной серии или целесообразно более детальное исследование их качества, обусловленное

тем, что данные приборы в процессе производства претерпели существенную модернизацию.

Для проверки выполнения во время ОЭ к метрологической надежности с приемлемой достоверностью необходима организация наблюдения за достаточно большим количеством приборов. Объем выборки можно сократить, используя априорную информацию о надежности приборов.

Для повышения эффективности ОЭ приборы целесообразно размещать в различных климатических зонах, добиваться повышенной интенсивности их использования в наиболее тяжелых, но допустимых условиях эксплуатации. При определении мест проведения ОЭ необходимо также учитывать возможности оперативного проведения поверочных и ремонтных работ.

40.3. Проведение опытной эксплуатации

Проведение ОЭ заключается в использовании приборов по прямому назначению в соответствии с инструкцией по эксплуатации и сборе при этом сведений об их техническом состоянии и приспособленности к условиям эксплуатации.

Наиболее приемлемым путем сбора информации по результатам ОЭ является ведение журнала.

Первичные сведения о значении метрологических характеристик заносятся в журналы ОЭ на заводах-изготовителях по результатам приемосдаточных испытаний образцов из установочной серии или серийно выпускаемых. На местах эксплуатации в журнале фиксируются наработка приборов, условия эксплуатации, характер использования, внешние проявления отказов и условия, при которых они возникли. В метрологических органах в журнал ОЭ заносятся результаты поверки и измеренные значения метрологических характеристик. В ремонтных органах отражаются сведения об отказавших элементах, установленные или предполагаемые причины отказов, характер проведенного ремонта и время, затраченное на отыскание и устранение неисправности.

Наряду с этим для оценки приспособленности приборов к условиям эксплуатации и ремонта в журнале ОЭ целесообразно предусмотреть опросную форму для заполнения на местах эксплуатации, поверки и ремонта. По этой форме собираются сведения, характеризующие работоспособность и удобство применения приборов при внешних воздействиях, соответствующим условиям эксплуатации, удобство транспортирования к месту эксплуатации, подсоединения к объекту измерений, пользования органами управления и отсчётными устройствами, регулировки, доступа к узлам, блокам и элементам при проведении ремонта, а также достаточность ЗИП и нормативно-технической документации для работы, проведения поверки и осуществления ремонта средств измерений. Кроме того, в указанную форму заносятся предложения по улучшению качества приборов.

40.4. Анализ результатов

Анализ результатов ОЭ заключается в оценке показателей качества приборов и проверке выполнения требований ТУ. Состав информации по результатам ОЭ можно использовать для оценки следующих показателей качества приборов:

надежности, т. е. безопасности (в том числе по метрологическим характеристикам) и ремонтпригодности;

назначения, т. е. основной погрешности, вариации показаний, диапазона измерений, длительности межповерочного интервала;

эргономических показателей и показателей, характеризующих приспособленность приборов к условиям эксплуатации и ремонта;

стойкости к внешним воздействиям в реальных условиях их эксплуатации;

удобства транспортирования к месту эксплуатации;

подсоединения к объекту измерений;

пользования органами управления и отсчетными устройствами;

использования средств измерения в тяжелых условиях эксплуатации;

защищенности от случайных включений и перегрузок;

защищенности оператора от вредных воздействий самого прибора;

оптимальности числа поверяемых параметров;

достаточности автоматизации процесса измерений и поверки;

удобства доступа к узлам, блокам и элементам приборов при проведении ремонта, регулировки;

достаточности маркировки узлов, блоков, а также ЗИП, научно-технической документации для эксплуатации, поверки и ремонта.

Глава 41. ДИАГНОСТИКА ПРИБОРОВ

41.1. Задачи диагностики

Широкий диапазон условий и режимов эксплуатации приборов приводит к значительной дисперсии скорости потери ими работоспособности. Поэтому весьма важно иметь методы и средства для оценки технического состояния прибора: определение степени его удаленности от предельного состояния, выявление причин нарушения работоспособности, установление вида и места возникновения повреждений и т. п.

Эти задачи решаются методами диагностирования, применение которых, особенно для сложных систем, позволяет получить большой экономический эффект за счет более полного использования потенциальных возможностей прибора и учета конкретных его свойств и условий эксплуатации.

Система диагностирования, которая включает объект и применяемые для этой цели средства, относится, по существу, к системам контроля. Однако специфика технической диагностики заключается в направленности ее ме-

тодов на определение состояния изделий, находящихся в эксплуатации, с выявлением необходимости восстановления утраченной работоспособности.

Это накладывает отпечаток на методы и средства диагностики, которые должны:

- быть удобными для применения в условиях эксплуатации;
- обеспечивать осуществление процесса в минимальное время;
- обладать большой точностью и достоверностью показаний, особенно при высоких требованиях к надежности изделий;
- в основном применять методы контроля без разборки, а в отдельных случаях – и без нарушения работы механизма;
- быть экономически целесообразными.

Результаты диагностирования могут быть использованы для прогнозирования надежности объекта и принятия решений о проведении ремонта или ТО. Объектом технического диагностирования могут быть изделие в целом или его составные части. Однако в большинстве случаев для сложных приборов контроль одного или нескольких элементов малоэффективен, так как остается неизвестным состояние остальных его частей.

Для этой цели, особенно для объектов с высокими требованиями к надежности, создаются сложные автоматизированные системы диагностики, которые измеряют большое число параметров приборов, обрабатывают эти показания и делают заключение о работоспособности объекта.

Прибор должен быть приспособлен для нужд диагностики: иметь встроенные приборы, оценивающие его параметры, или периодически подключаться к специальному устройству, осуществляющему контроль основных параметров прибора и дающему заключение о его состоянии.

41.2. Диагностические признаки

Для каждого изделия имеется большое число диагностических признаков (параметров), по которым можно судить о его техническом состоянии. По этим параметрам и признакам можно выделить три основных вида контроля исследуемых приборов:

1. Контроль выходных параметров изделия и его узлов, определяющих его работоспособность согласно установленным ТУ. Обычно эти параметры могут быть измерены тем или иным способом с использованием методов, применяемых для контроля готового изделия. Более доступен, как правило, контроль выходных параметров приборов или его функциональных узлов. Контроль выходных параметров дает ответ на вопрос о работоспособности изделия, но не определяет места и вида повреждения, приводящего к отказу.

2. Контроль повреждений, которые приводят или могут привести к отказу изделия. Величины износа, деформации, степень коррозии и т. п. также являются теми диагностическими признаками, по которым можно сделать вывод о техническом состоянии изделия. Они являются первопричиной отказа и с выходными параметрами связаны функциональной зависимостью.

В общем, должен быть осуществлен поиск неисправностей, например, методом последовательной проверки элементов или методом последовательных разбиений всего множества элементов на две части. В последнем случае процедура обнаружения места повреждения при сигнале о недопустимом изменении выходного параметра или отказе функционирования изделия заключается в разделении всех возможных мест повреждений на две части и контроле (в совокупности) работоспособности каждой из них. Неисправную часть разбивают на две и анализ продолжают до тех пор, пока не будет обнаружено место повреждения.

3. Контроль работоспособности изделия по косвенным признакам производится в случае, когда непосредственное измерение выходных параметров затруднительно или требуется интегральная характеристика состояния изделия. Эти признаки должны быть функционально связаны с работоспособностью изделия и отражать изменения, происходящие в приборе. Косвенными диагностическими признаками могут служить: акустические сигналы; изменение температуры изделия; давление в системе; наличие в смазке продуктов износа; изменение параметров, характеризующих динамическое состояние системы (амплитудно-фазовых и частотных характеристик) и т. п.

Существенным преимуществом использования косвенных признаков является возможность оценки изделия в процессе его работы или, во всяком случае, без разборки (при диагностировании в специальных условиях).

41.3. Анализ диагностического сигнала

При осуществлении процесса диагностирования выбираются те признаки и параметры, контроль которых дает наиболее объективные сведения о состоянии прибора.

Датчики, измеряющие отдельные параметры прибора, дают сигналы, на основе которых необходимо сделать заключение о техническом состоянии объекта с указанием, при необходимости, места, вида и причин дефектов.

Сигнал, по которому надо судить о значении признака (выходной параметр, степень повреждения или косвенный признак), может иметь различный характер. Наиболее простым является случай, когда показание датчика непосредственно характеризует состояние объекта, точность измерения достаточно велика и влияние посторонних факторов можно не учитывать. Здесь нахождение показаний прибора в допустимых пределах свидетельствует о работоспособности изделия, а по величине сигнала можно судить о близости к предельному состоянию.

Однако в ряде случаев, особенно при суждении об отказе по косвенным признакам, на сигнал могут оказывать влияние не только степень повреждения элемента или узла, но и посторонние факторы (помехи), искажающие полученную информацию.

В этом случае для повышения достоверности показаний необходимо иметь группу признаков, характеризующих степень приближения к отказу –

«синдром отказа», с тем чтобы по их сочетанию судить о действительном состоянии объекта. Так, если при диагностике подшипника одновременно с измерением температуры масла контролировать и точность его вращения или уровень вибраций, то вероятность правильного диагноза повысится.

Большую информацию, чем показания датчика, дающего численное значение параметра, несет сигнал в виде функциональной зависимости. Такими сигналами будут, например, законы изменения усилий или крутящих моментов за цикл работы механизма или законы перемещения отдельных звеньев: вибрации, возникающие в системе; акустические характеристики и т. п. Анализ изменений, происходящих в законах движения, спектральный анализ процессов вибрации или акустических сигналов и другие методы оценки функций позволяют из одного сигнала выделить ряд составляющих, характеризующих состояние различных элементов или узлов изделия.

Таким образом, сигнал, выдаваемый в виде реализации некоторой закономерности, заменяет показания целого ряда приборов, определяющих дискретные значения отдельных параметров.

41.4. Диагностирование сложных приборов

При диагностировании сложных приборов, работоспособность которых характеризуется большим числом выходных параметров, возникает ряд дополнительных проблем:

- 1) установление номенклатуры основных диагностических сигналов с тем, чтобы они характеризовали работоспособность исследуемого прибора;
- 2) по набору этих данных составление суждения о техническом состоянии всего прибора, необходимости его ремонта или о времени, в течение которого он сможет сохранить свою работоспособность;
- 3) разработка системы технического диагностирования, включающей технические средства и алгоритм диагностирования, т. е. совокупности предписаний о проведении диагностирования, а также выбор метода диагностирования (функциональное или тестовое).

Обычно эти вопросы решаются на основе общих положений теории надежности с использованием моделей отказов, оценки предельного состояния изделия, методов прогнозирования изменений состояния объекта, изучения физики отказов и других данных.

Разработке систем технического диагностирования предшествуют, как правило, исследования, устанавливающие связи между характеристиками диагностических сигналов и состоянием прибора. При этом учитывается, что диагностирование может быть *функциональным*, осуществляемым во время работы прибора, когда действуют только рабочие нагрузки, и *тестовым*, при котором на объект подаются специальные воздействия и по реакции прибора судят о его техническом состоянии. Тестовые воздействия не должны влиять на правильность функционирования и работоспособность изделия.

При разработке систем и методов диагностирования сложного объекта основываются на аналитических или графоаналитических представлениях основных свойств изделия в виде так называемых диагностических моделей. Они могут быть представлены в векторной форме, в виде системы дифференциальных уравнений или передаточных функций, связывающих входные и выходные параметры.

Раскрытие этих связей и разработка системы диагностирования сложного объекта могут осуществляться двумя основными способами или их комбинацией.

Первый способ диагностирования заключается в получении большого числа сигналов, характеризующих работу отдельных узлов и элементов прибора, на основании которых делается заключение о его состоянии. При тестовом методе диагностирования для получения необходимых диагностических сигналов надо выбрать вид и последовательность специальных воздействий на прибор.

Полученное в процессе диагностирования большое число разнообразных данных должно быть обработано по специальной программе с тем, чтобы определить ту категорию состояния, в которой находится прибор, и те действия, которые необходимо предпринять, чтобы восстановить его работоспособность.

Для этой цели с успехом применяется вычислительная техника, когда на вход ЭВМ подаются выходные данные испытуемого прибора, которые преобразуются в цифровой код. Вычислительная машина по специальной программе задает испытываемому изделию определенный режим работы (при тестовых испытаниях), сравнивает его выходные данные с эталонными значениями, хранящимися в ее памяти, выбирает результат диагноза в виде специальных карт, в которых кроме указания поврежденных деталей содержатся инструкции по их ремонту.

Для оценки состояния изделия по многим показателям используется теория распознавания незрительных образов, когда по совокупности значений множества параметров судят о принадлежности объекта к тому или иному классу. Например, 1-й класс – объект работоспособен; 2-й класс – объект работоспособен, но требует подналадки; 3-й класс – объект неработоспособен и требует ремонта.

Второй способ диагностирования заключается в применении методов, которые позволяют судить о состоянии прибора по параметрам какого-либо динамического процесса, связанного с функционированием механизмов и отражающего состояние прибора. Такой процесс можно разложить на составляющие и получить необходимую информацию о работоспособности отдельных механизмов. При этом, в принципе, возможно использовать всего один преобразователь или, во всяком случае, ограниченное число диагностических сигналов.

При работе механизмов прибора происходят удары, возбуждающие в материале упругие колебания, которые регистрируются соответствующими

щими датчиками. Поскольку при возбуждении колебаний одновременно всеми кинематическими парами прибора образуется единое волновое поле, основная задача при диагностировании этим методом заключается в разделении суммарного сигнала на составляющие так, чтобы можно было оценить вклад каждой кинематической пары.

Глава 42. РЕМОНТОПРИГОДНОСТЬ ПРИБОРОВ

42.1. Общие сведения о ремонтпригодности приборов

Ремонтпригодность есть свойство приспособленности прибора к обнаружению, устранению и предупреждению отказов и выполнению ремонтов в течение заданного времени при полном обеспечении ремонтными средствами и запасными частями. Прибор с высокой ремонтпригодностью позволяет проводить ремонты наиболее простыми средствами и с минимальными затратами со стороны обслуживающего персонала.

Ремонт прибора во время эксплуатации состоит из двух видов – текущего и профилактического.

Текущий ремонт производится при обнаружении неисправности, которую необходимо устранить на месте для восстановления работоспособности аппаратуры.

Профилактический ремонт состоит из ряда регламентных работ, объем и сроки исполнения которых заранее предусматриваются для данного прибора. Такой вид ремонта состоит из периодической регулировки, подстройки, чистки, смазки, а также замены некоторых деталей, срок службы которых истек, независимо от их фактического состояния. Во время профилактического ремонта устраняются все замеченные неисправности.

Ремонтпригодность определяется:

средствами проверки функциональных и параметрических величин прибора;

временем, необходимым для отыскания места неисправности и выяснения ее характера;

доступом к сменным узлам с минимальной затратой времени;

взаимосвязью узлов и удобством их замены;

обеспеченностью и состоянием ремонтного инструмента и оборудования;

укомплектованностью запасными частями и принадлежностями;

условиями размещения прибора в комплексах.

Восстановление работоспособности прибора может производиться при самых неблагоприятных условиях. Поэтому обеспечение оперативного доступа к сменным узлам прибора и удобство замены вышедших из строя элементов с учетом наиболее неблагоприятных условий эксплуатации являются одной из главных задач конструктора.

Ремонтпригодность заранее не может быть задана в определенной количественной форме. Однако ее уровень уже достаточно точно может

быть определен такими показателями, как вероятность отказов, готовность системы к работе и время выполнения работ по восстановлению работоспособности.

42.2. Факторы, определяющие ремонтпригодность приборов

Специфическое свойство ремонтпригодности приборов заключается в том, что она зависит от конструкции прибора, а проявляется в конкретных условиях эксплуатации. В зависимости от этих условий потенциальные возможности конструкции могут быть использованы в большей или меньшей степени.

При конструировании прибора основное влияние на его ремонтпригодность оказывают следующие факторы:

общая компоновка прибора с точки зрения доступности к его узлам и механизмам для контроля их состояния, обслуживания и проведения ремонтных работ;

простота разборки и монтажа узлов и сопряжений, в первую очередь тех, которые могут входить в межремонтное обслуживание: быстросменность элементов, обладающих малой стойкостью;

применение принципа агрегатирования, когда прибор легко расчленяется на отдельные узлы и блоки, причем присоединение их к прибору не требует применения специальных приемов;

использование стандартных узлов и элементов; применение принципа унификации, когда ремонтники и эксплуатационники встречаются с однотипными и одинаковыми узлами и механизмами в различных приборах;

применение принципов автоматической подналадки и компенсации износа саморегулирования параметров прибора, автоматизации профилактических операций;

простота обнаружения отказов или повреждений за счет встроенных приборов, контролирующих выходные параметры изделия и диагностирующих его состояние;

возможность производить регулировку, замену износившихся элементов, осуществлять диагностику и другие работы простыми методами, без применения высококвалифицированной рабочей силы.

42.3. Критерии ремонтпригодности

Объем работ по восстановлению безотказности прибора в достаточной степени характеризуется вероятностью отказа и средним временем ремонта, затрачиваемым на один отказ.

Если вероятность безотказной (исправной) работы прибора находится в пределах $Q(t) \leq P(t) \leq 1$, то очевидно, что вероятность противоположного события – отказа $Q(t)$ – может быть записана в виде

$$Q(t) = 1 - P(t).$$

На основании теории надежности $P(t) = e^{-\lambda t}$. Поэтому

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t},$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы;

λ – интенсивность отказов;

t – время безотказной работы прибора.

Когда задано среднее время ремонта прибора, приходящееся на один отказ, с помощью вероятности отказа можно аналитически определить то время, которое система должна находиться в состоянии ремонта. Например, предположим, что вероятность безотказной работы в течение 100 ч равна 0,99. Если прибор состоит из 1000 элементов, то в течение исходного времени (100 ч), вероятно, выйдет из строя 0,01 их часть

$$Q(t) = 1 - 0,99 = 0,01,$$

что составляет 10 элементов, которые могут вызвать 10 отказов. Если известно среднее время ремонта на один отказ $t_{\text{в}}$, то на устранение 10 отказов понадобится время, равное $10 t_{\text{в}}$.

Таким образом, среднее время ремонтов прибора на один отказ определяется общим временем ремонтов и количеством отказов за определенный промежуток времени. Эта характеристика является *основным критерием ремонтпригодности*.

При отказе прибора восстановление его безотказности производится исполнением ряда последовательных однотипных операций в течение определенного времени:

обнаружение неисправности и отключение неисправного участка с затратой времени t_1 ;

вскрытие доступа к неисправному участку и отыскание неисправного узла t_2 ;

восстановление его работоспособности (извлечение запасного узла из ЗИПа, изъятие вышедшего из строя, установка запасного на его место) t_3 ;

послеремонтная проверка готовности к работе t_4 ;

настройка, регулировка или калибровка параметров, закрытие прибора и пуск системы в работу t_5 .

Общее время, затраченное на ремонт $T_{\text{р}}$, составляет сумму времени, затраченного на перечисленные пять операций:

$$T_{\text{р}} = T_{\text{р}} = \sum_{i=1}^{n=5} t_i.$$

Среднее время восстановления безотказности прибора на один отказ можно определить по формуле

$$t_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n},$$

где t_i – время, затраченное на устранение i -го отказа;

n – количество отказов за определенный промежуток времени.

Связь между надежностью и ремонтпригодностью характеризуется также и коэффициентом готовности прибора к работе K_r , который определяется отношением среднего времени исправной работы на один отказ T_0 к сумме этого времени и среднего времени восстановления данной системы на один отказ, т. е.

$$K_r = T_0 / (T_0 + t_B).$$

Коэффициент вынужденного простоя (бездействия) прибора из-за ремонтов K_{Π} будет определяться отношением среднего времени восстановительного ремонта на один отказ к сумме исправной работы системы и среднего времени ее восстановления:

$$K_{\Pi} = t_B / (T_0 + t_B),$$

причем

$$K_r + K_{\Pi} = 1.$$

42.4. Меры обеспечения ремонтпригодности

Наиболее совершенной надо считать конструкцию прибора, которая одновременно с большой надежностью имеет минимальные габаритные размеры, массу и высокую ремонтпригодность. Высокая ремонтпригодность отличается отсутствием сложных установочных манипуляций, дополнительных электромонтажных работ, длительных разборочных операций и большого количества винтовых креплений. Главными качествами ремонтпригодности являются несложность обслуживания, простота и оперативность операций восстановительного ремонта.

При разработке приборов наиболее важную роль в обеспечении ремонтпригодности играет оперативный доступ к сменным узлам. Из большого числа разнообразно решаемых способов обеспечения доступа к сменным узлам минимальными и достаточными могут служить следующие пять.

Первый способ – наиболее простой, обеспечивающий доступ к блокам без снятия мест их крепления за счет съема крышек и кожухов прибора.

Второй способ предусматривает обеспечение доступа к элементам блоков, когда последние освобождаются от креплений и снимаются с прибора.

Третий способ применяют в блоках, выдвигающихся из корпуса прибора.

Четвертый способ применяют для группы блоков с горизонтальными шасси, которые устанавливаются в перегородках корпуса прибора на телескопических направляющих. Направляющие позволяют не только выдвигать блоки, но и разворачивать их на 90°.

Пятый способ включает установку блоков, откидывающихся из корпуса прибора, с последующей фиксацией этого положения ограничителями.

42.5. Системы контроля и отыскания неисправностей

Системы контроля и отыскания неисправностей могут быть ручными, полуавтоматическими, автоматическими, автономными или встроенными в контролируемый прибор. Автономная система komponуется из отдельных приборов, встроенная конструктивно представляет собой единое целое с контролируемым изделием. Ручной контроль параметров применяется в сравнительно несложных приборах, полуавтоматический – в аппаратуре средней сложности. В сложных приборах наиболее распространен автоматический способ контроля.

Точки прибора, к которым подключается контрольно-измерительная аппаратура, называются *контрольными*. К ним относятся точки на входе и выходе сменных узлов, на электрических соединителях, а также на основных выносных (наружных) приборах системы. Любая неисправность, возникшая в системе, определяется без снятия каких-либо контролируемых узлов.

На контрольных панелях монтируют органы контроля, ручное управление и сигнальные устройства. Во время работы системы лицевые панели встроенного контроля остаются закрытыми легкими крышками или шторками, чтобы не отвлекать внимание оператора от основной работы. Открытыми остаются лишь устройства, сигнализирующие о неисправности. На лицевой панели размещают и элементы контроля неисправности самих контрольных устройств.

Ручной контроль применяется в несложных приборах и производится с помощью комплекта контрольно-измерительных приборов, хранящихся в ЗИП, или с помощью встроенной контрольной панели с измерительными многопозиционными переключателями, связанными с контрольными точками прибора.

Полуавтоматический контроль применяется в приборах средней сложности. Он запускается в работу ручным способом при наличии сигнала о неисправности, снимаемого с индикаторов. С помощью контрольной панели выполняются послеремонтные проверочные и калибровочные работы.

Автоматические устройства встроенного контроля обнаруживают вышедшие из строя узлы прибора, взамен включают их резервные, регистрируют это включение в памяти, контролируют все режимы работы, обеспечивают необходимые регулировки или информируют оператора о выходе параметров за пределы допуска. Система встроенного контроля должна иметь более высокую надежность, чем основной прибор.

42.6. Общий порядок поиска неисправностей

При диагностике приборов первоначально производится их визуальный осмотр. В ряде случаев внешнее проявление неисправности позволяет

в дальнейшем локализовать место ее нахождения. Даже не вскрывая прибор, можно получить достаточно информации о его состоянии. На передней панели прибора расположены различные органы управления, индикации и т. д. Работа с ними позволяет определить возможное место неисправности в приборе.

В практике ремонта приборов известны следующие способы обнаружения причин неисправностей, основанные на внешних признаках:

- способ характерных неисправностей;
- способ контрольных переключений;
- способ сравнения;
- способ замены деталей (узлов).

Способ *характерных неисправностей* позволяет определить неисправность на основе известных признаков, однозначно характеризующих ее. Часто перечень характерных неисправностей и признаки их проявления указываются в эксплуатационно-технической документации на прибор, что обеспечивает локализацию отказов.

Способ *контрольных переключений* состоит в том, что путем оценки внешних признаков проявления неисправностей и анализа взаимодействия элементов в различных режимах исправные узлы прибора последовательно исключаются из рассмотрения. При этом используется информация от средств текущего контроля: сигнальных ламп, встроенных приборов и т. п. Анализируя работу прибора в различных режимах, можно сузить область поиска неисправности. В том случае когда прибор не функционирует во всех режимах, причиной неисправности является выход из строя узлов, блоков, задействованных во всех режимах. Такими элементами являются блоки питания, схемы синхронизации, микропроцессорные БИС и др.

В процессе визуальной проверки разобранного прибора можно обнаружить разорванные проводники, отслоившийся печатный монтаж, окислившиеся места паяных соединений, поврежденные корпуса интегральных микросхем, резисторов, согнутые штырьки и другие дефекты.

В случае использования способа *сравнения* сопоставляют признаки работы исправного узла диагностируемого прибора и однотипного узла заведомо работоспособного прибора. При этом можно получить достаточно много информации, позволяющей быстрее локализовать место нахождения неисправности.

При наличии запасных микросхем (узлов, блоков) прибора можно локализовать неисправность способом *замены деталей*, однако при этом существует опасность повредить годную микросхему вследствие электрических перегрузок, которые повредили предыдущую микросхему. Поэтому перед заменой микросхемы целесообразно убедиться в том, что на нее подаются верные значения питающих напряжений, отсутствуют короткие замыкания в выходных цепях и перегрузки на входе. В любом случае при замене микросхем источник питания должен отключаться от прибора. Такой метод иногда позволяет быстро обнаружить неисправный элемент и одно-

временно устранить отказ. Однако при этом требуются заведомо исправные элементы (блоки, микросхемы, узлы и др.). Кроме того, из-за сложности демонтажа отдельных элементов этот метод не всегда можно использовать. Частая замена элементов в некоторых случаях может понизить надежность прибора. Поэтому такой метод чаще всего применяют при отыскании отказов в сменных узлах приборов.

Начинать локализацию отказов всегда следует с применения способов характерных неисправностей и контрольных переключений, как наименее трудоемких. Если ни один из них не приведет к выявлению отказавшего элемента, необходимо перейти к способам сравнения и замены.

Перечисленные рекомендации помогают упорядочить диагностику приборов, но не дают четких правил, позволяющих отыскать отказавший элемент в сложном приборе. Для этого целесообразно использовать научно обоснованные методы поиска неисправностей, предусматривающие выполнение ряда контрольных операций по определенному плану.

Место нахождения неисправности локализуют с помощью различных поисковых процедур, направленных на последовательное сужение области нахождения дефекта. При этом план поиска строят на основе статистических (априорных) данных о надежности средства измерений и его элементов, сведений о структуре (схеме) и результатов контроля его параметров. Таким образом, для выявления отказавших элементов приборов в определенной последовательности проверяют исправность отдельных элементов или групп элементов. Проверка представляет собой совокупность операций, производимых на объекте диагностирования, для получения некоторых результатов, по которым можно судить о состоянии по крайней мере одного элемента. Иначе говоря, проверка – это контроль, в ходе которого измеряются отдельные параметры и наблюдаются реакции на определенные стимулирующие воздействия. Последние представляют собой либо естественные сигналы, поступающие на вход исследуемых элементов приборов, либо специально подаваемые воздействия от генераторов стимулирующих сигналов.

Различают поэлементную проверку приборов, проверку по блокам (или модулям) и проверку по группам элементов (которые не образуют функциональной единицы в составе прибора).

Чтобы поиск отказавших элементов был эффективным, необходимо рационально, с учетом конкретных условий, в которых проводится поиск, выбрать способы проверки элементов и установить правильный «маршрут» поиска, т. е. правильную последовательность проверок. При выборе маршрута поиска необходимо учитывать вероятности отказов элементов: чем надежнее элемент, тем меньше вероятность его отказа, следовательно, он может быть проверен позднее.

42.7. Методы поиска отказавших элементов

Различают два основных метода поиска неисправностей: комбинационный и последовательный.

При *комбинационном* методе поиска состояние элементов прибора определяют путем выполнения заданного числа проверок, порядок проведения которых может быть произвольным. Отказавшие элементы выявляют после выполнения всех заданных проверок, сопоставляя и анализируя их результаты. Метод называют комбинационным потому, что неисправный элемент обнаруживают на основании совокупности (комбинация) проверок. Он довольно эффективно используется в сложной оптико-электронной аппаратуре при наличии встроенных средств контроля.

Разновидностью комбинационного метода можно считать способ *поэлементной* проверки, когда проверяют все без исключения элементы. После этого элементы разделяют на годные и негодные. Такая проверка проводится при капитальном ремонте измерительной техники либо при наличии в приборах более одного неисправного элемента. Комбинационный метод приводит к большим трудозатратам и поэтому в случае поиска единичных неисправностей в приборах используется редко (как правило, для обнаружения отказавших блоков, узлов).

При *последовательном* методе поиска неисправностей проверки выполняют в определенном порядке, который обеспечивает наиболее рациональную их очередность. Результаты каждой проверки анализируют непосредственно после ее проведения, и если отказавший элемент еще не определен, то выполняют следующую по порядку проверку. Порядок выполнения проверок может быть строго фиксированным (заранее заданным) или же зависеть от результатов предыдущих проверок. В соответствии с этим различают две модификации последовательного поиска:

1) последовательных *поэлементных* проверок, выполняемых в некотором заранее заданном жестком порядке, который определяется до начала поиска неисправности и при его проведении остается неизменным;

2) последовательных *групповых* проверок, когда каждая последующая проверка назначается в зависимости от исхода предыдущих.

Эффективность различных методов последовательного поиска оценивают средним временем поиска неисправностей или числа проверок, проведенных для выявления отказавших элементов.

При использовании метода *последовательных поэлементных* проверок элементы приборов проверяют по одному в определенной, заранее заданной последовательности. Если проверенный элемент оказался неисправным, поиск прекращают и производят восстановление прибора. Различают следующие разновидности метода последовательных поэлементных проверок:

выборочный;

неупорядоченный;

поиск по принципу от начала к концу или от конца к началу.

При *выборочном* методе поиска неисправностей учитывают вероятности отказов и время (или стоимость) проведения каждой проверки. Для пояснения этого метода предположим, что функциональный узел состоит из n элементов, соединенных между собой произвольным образом. Пусть за-

ранее известны вероятности отказов $Q_1, \dots, Q_i, \dots, Q_n$ и среднее время (стоимость) проверки каждого элемента $\tau_1, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n$. Предположим, что отказал только один элемент. Начнем проверять элементы по одному. Тогда при какой-либо очередной проверке будет обнаружен отказавший элемент. Конечно, желательно проверить его в самом начале поиска и тем самым сократить время диагностики прибора.

Если время проверок всех элементов одинаково или неизвестно, тогда руководящим соображением при выборе порядка проверки должна быть вероятность отказа: первым должен проверяться элемент с наибольшей вероятностью отказа, вторым (если первый оказался исправным) – элемент с несколько меньшей вероятностью отказа, чем первый, и т. д., т. е. элементы следует проверять по порядку убывания вероятностей их отказа.

В другом крайнем случае, когда все вероятности отказа равны (или неизвестны), но затраты времени на проверку элементов различны, определяющим соображением в выборе порядка проверки должна быть продолжительность каждой из них. При этом элементы надо проверять по порядку возрастания затрат времени: первым – элемент с наименьшим временем проверки, вторым – элемент с несколько большим временем проверки, чем у первого, и т. д.

В общем случае, когда вероятности отказов и время на проверку элементов различны, поиск неисправности следует проводить в порядке убывания отношения $Q_i / \tau_i, i = 1, 2, \dots, n$, вычисленного для каждого элемента. Например, если $Q_3 / \tau_3 > Q_6 / \tau_6 > Q_1 / \tau_1 > \dots$, то эти элементы должны проверяться в следующем порядке: 3, 6, 1-й, ... При таком порядке поиска среднее время обнаружения неисправности будет минимальным.

В случае когда сведения о надежности элементов и временных затратах на их проверку отсутствуют, отказавший элемент ищут в произвольном порядке. Такой неупорядоченный метод только частично налаживает процесс поиска, организуя его от начала к концу или от конца к началу.

Недостатком метода последовательных поэлементных проверок является большое число измерений. Объясняется это тем, что в данном методе при поиске неисправностей не используются функциональные связи отдельных элементов, хотя такой подход делает метод универсальным, так как не зависит от функциональной схемы прибора. Поэтому тогда, когда можно установить функциональные связи между элементами прибора и проследить последовательное преобразование сигнала в схеме, используют метод последовательных групповых проверок.

Сущность этого метода заключается в том, что все элементы прибора или его составной части с учетом их функциональных связей разбивают на отдельные группы и контролируют исправность каждой группы в отдельности. Очередная проверка определяется результатами предыдущих проверок. По мере проведения проверок число элементов в группе уменьшается. На последнем этапе контроля в группе должен быть один элемент.

42.8. Обеспечение приборов запасными частями

На трудоемкость ремонта большое влияние оказывает возможность быстрой замены поврежденного узла или детали прибора и восстановления за счет этого утраченной работоспособности.

Обычно для эксплуатации приборов предусматриваются запасные части, номенклатура которых отражает характер типичных повреждений, возникающих в приборе, а их количество – соответствовать потребности, исходя из сроков службы и методов ремонта. Конструкция прибора должна быть приспособлена к осуществлению быстросменности.

Наличие запасных частей значительно сокращает время и стоимость ремонта и, как правило, полностью восстанавливает утраченную работоспособность, поскольку эти детали изготовлены в тех же условиях, что и установленные в приборе, и обладают необходимыми показателями качества. Это дает большой экономический эффект, увеличивает межремонтный период, способствует эксплуатации прибора в разнообразных условиях.

В различных отраслях приборостроения создаются специализированные заводы или подразделения для производства запасных частей, причем это производство обычно занимает существенную долю в общем объеме продукции.

Однако правильное планирование выпуска запасных частей является сложной задачей.

Во-первых, установление номенклатуры быстроизнашивающихся частей на стадии проектирования или для нового прибора, не имеющего опыта эксплуатации, не всегда представляется возможным. Отсутствие данных по скорости изнашивания деталей и срокам службы, недостаточная информация об эксплуатации прототипов или аналогичных изделий, неточность методов расчета сроков службы – все это приводит к тому, что конструктор может установить перечень быстроизнашивающихся деталей лишь с грубым приближением.

Во-вторых, при определении потребности в запасных частях на весь период эксплуатации прибора не всегда известны спектры предполагаемых или имеющих место эксплуатационных нагрузок, условий работы и ремонта прибора.

Поэтому часто трудно оценить даже средние значения сроков службы или скоростей изнашивания отдельных деталей и сопряжений по ним – потребность в объеме запасных частей.

Количество необходимых запасных частей при эксплуатации приборов можно оценить двумя основными способами:

1) на основании статистических данных из сферы эксплуатации, что дает достаточно точную картину лишь для устойчивых в конструктивном отношении моделей приборов и при постоянном анализе тенденций потребности в запасных частях;

2) методом расчета в сочетании со статистическим моделированием (на стадии проектирования расчет показателей надежности, рассмотренных выше, является базой и для оценки потребности в запасных частях).

Наличие в приборе запасных частей, которые заменяются при межремонтном обслуживании или при текущих плановых ремонтах, накладывает отпечаток и на конструкцию прибора. Помимо удобства демонтажа и установки заменяемой части необходимо, чтобы заменялся как можно меньший по массе и простой по конфигурации узел. Это часто связано с применением специальных конструктивных решений, которые упрощают и удешевляют ремонт и эксплуатацию прибора, а также производство запасных частей. Например, при износе сложного кулачка может заменяться не весь кулачок, а лишь изношенная часть профиля; при смятии отверстий под пальцы у рычагов и многозвенных механизмов должен заменяться не рычаг, а его головка или втулки под отверстия и т. п.

Конструкция прибора должна соответствовать требованиям ремонтнопригодности.

42.9. Ремонтосложность прибора

Помимо характеристики ремонтнопригодности часто возникает потребность в оценке сравнительной трудоемкости ремонта приборов различного конструктивного оформления и различной сложности. При планировании ремонтных работ один из приборов удобно выбрать за эталон, с которым сравнивать трудоемкость ремонта всех остальных моделей, оценивая ее в относительных показателях (коэффициентах).

Этот метод удобен тем, что для вновь создаваемого прибора можно с достаточной степенью приближения подсчитать показатель ремонтосложности, если известно влияние на него основных конструктивных факторов и технических характеристик.

Эти корреляционные зависимости можно получить на основании исследования и анализа фактической трудоемкости различных изделий. Ведущее влияние на показатель ремонтосложности оказывают вес прибора и его габариты, общее число деталей или сопряжений в приборе, конструктивные параметры данной модели и т. п. Так, например, для крупных приборов ремонтосложность нового изделия можно рассчитать по формуле

$$R = \left(\frac{G}{G_э} \right)^{0,4} \left(\frac{n}{n_э} \right)^{0,8},$$

где G и $G_э$ – масса оцениваемого прибора и прибора-эталона;

n и $n_э$ – число деталей оцениваемого прибора и эталона.

Показатели степени в приведенной формуле получены на основании статистической обработки данных о влиянии G и n на трудоемкость ре-

монта. Применение относительных показателей ремонтосложности облегчает оценку ремонтпригодности приборов.

Глава 43. ДЕФЕКТАЦИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ

43.1. Методы дефектации

В процессе эксплуатации изменяется техническое состояние всех сборочных единиц и деталей прибора, однако это изменение происходит с неодинаковой скоростью. Одни сборочные единицы и детали изменяются незначительно и вновь пригодны для сборки, другие требуют проведения ремонтно-восстановительных работ, третьи повреждены настолько, что их ремонт не гарантирует восстановления надежности или же ремонт экономически не оправдан.

Допустимые отклонения технического состояния сборочных единиц и деталей приводятся в ремонтной документации. Всякое отклонение, превышающее допустимое значение, приводит к тому, что сборочная единица или деталь будут считаться дефектными. *Дефектом* называют каждое отдельное несоответствие требованиям, установленным ремонтной документацией.

Дефектацией называют комплекс контрольных операций, которые определяют техническое состояние и годность сборочных единиц и деталей ремонтируемого изделия. Цель дефектации – выявление неисправностей, определение пригодности сборочных единиц и деталей к сборке, назначение вида и объема ремонта. Дефектация является ответственной частью процесса ремонта, поскольку ее результаты существенным образом определяют как надежность отремонтированных приборов, так и технико-экономические показатели ремонтного предприятия. Поэтому в процессе дефектации необходимо добиваться максимально точной оценки технического состояния объектов дефектации и максимально возможного восстановления деталей и сборочных единиц.

Дефектация может быть субъективной, объективной и смешанной.

Субъективная дефектация проводится в основном с помощью органов чувств человека с применением простейших технических средств: лупы, микроскопа, динамометра, отвертки, позволяет давать приближенную оценку технического состояния дефектируемых элементов без каких-либо точных количественных показателей. Достоверность такой дефектации во многом определяется квалификацией и опытом работников.

Объективная дефектация и техническая диагностика являются наиболее точными, современными и быстро развивающимися методами оценки технического состояния изделия, его элементов. Объективная дефектация, выполняемая с помощью контрольно-измерительных приборов, дает точную количественную информацию о техническом состоянии объектов дефектации.

Смешанная дефектация включает в себя субъективную дефектацию всех сборочных единиц и деталей, а также объективную дефектацию наи-

более ответственных и напряженных элементов или их определенных параметров и характеристик.

Дефектацию начинают с технического осмотра всех сборочных единиц и деталей.

После технического осмотра производят необходимые проверки и измерения с помощью контрольно-проверочной аппаратуры и измерительных инструментов. Контролю подвергают параметры сборочных групп, сборочных единиц и готовых изделий. На деталях проверяют действительные размеры поверхностей, подверженных наибольшему износу. *Действительным размером* называют размер, установленный измерением детали. Действительные размеры должны соответствовать рабочим чертежам, т. е. размерам новых деталей, или ремонтным размерам, приводимым в руководствах по ремонту и ремонтных чертежах. Наиболее ответственные и тяжелонагруженные детали для обнаружения скрытых дефектов подвергают контролю неразрушающими методами магнитной, ультразвуковой, люминесцентной дефектоскопии.

В результате дефектации все сборочные единицы и детали прибора разделяются на три группы:

- 1) пригодные для сборки;
- 2) требующие ремонта;
- 3) непригодные для сборки. Непригодные детали должны быть немедленно изолированы и подвергнуты утилизации.

Результаты дефектации вносят в ведомость дефектов, форма которой установлена на ремонтном предприятии. Ведомость дефектов служит основанием для направления сборочных единиц и деталей прибора в ремонт, проведения восстановительных работ, использования комплекта запасных частей для замены непригодных деталей. На сборочные единицы и детали, признанные при дефектации пригодными для сборки без ремонта, должно быть нанесено клеймо способом, принятом на ремонтном предприятии.

43.2. Измерения при дефектации

Преимущественное место при дефектации приборов занимают измерения параметров сборочных групп и единиц, выполняемые с помощью контрольных приспособлений и измерительных приборов. Потребность в проверке некоторых размеров деталей возникает для немногих тяжелонагруженных элементов деталей и поверхностей с видимым значительным износом. Проведение контроля определенных размеров может регламентироваться ремонтной документацией.

В процессе эксплуатации вследствие изнашивания происходит изменение геометрических размеров и формы трущихся деталей приборов. На интенсивности изнашивания сказывается нагруженность детали, условия ее работы. Возможность использования деталей, подверженных наибольшему износу, для сборки отремонтированного прибора должна быть установлена

в процессе дефектации. Это достигается измерением действительных размеров изношенных деталей, вычислением зазоров в соединениях, сравнением полученных данных со значениями предельно допустимых размеров и зазоров, приводимых в руководствах по ремонту и ремонтных чертежах. Размеры или допускаемые отклонения, устанавливаемые для деталей, предназначенных для сборки отремонтированного изделия, называются *ремонтными размерами* или *допусками*. Ремонтные размеры и допуски, определенные на основании анализа изделия и изучения эксплуатационных данных, подтверждаются расчетами, испытаниями, опытным ремонтом, после чего вносятся в руководства по ремонту и в ремонтные чертежи.

Контроль размеров в ремонтном производстве ввиду его мелкосерийного характера выполняется универсальными измерительными инструментами и приборами. Кроме того, применяются специализированные инструменты и стандартные калибры. В зависимости от степени точности для измерений используют штангенциркули, микрометры, глубиномеры. Более точные измерения могут быть выполнены с помощью миниметров, измеряющих действительные отклонения размеров, при этом номинальный размер набирается плоскопараллельными концевыми мерами (плитками). Широко используются измерительные приспособления, сочетающие индикатор часового типа с подставками и кронштейнами различных конструкций. Определенные трудности возникают при измерении охватывающих поверхностей (отверстий) ввиду их малой величины. Обычно размеры отверстий измеряют калибрами-пробками.

Кроме калибров, рассчитанных на контроль определенного размера, употребляются комплексные калибры. Их используют для контроля резьбовых деталей, шлицев, соосности, стыковочных элементов прибора. Элементы резьбы можно измерить также на инструментальном микроскопе. Аналогично контролируют нарезку червяков червячных передач.

Степень износа зубьев зубчатых колес с достаточной точностью может быть оценена измерением размера по роликам для колес как с внешними, так и с внутренними зубьями. Допустимые размеры по роликам и размеры роликов приводятся в ремонтной документации. Ролики укладывают в диаметрально противоположные впадины колес, а измерение производят микрометром. Измерения следует производить в трех плоскостях.

Зазоры в муфтах и контактных системах измеряют щупами из стандартных наборов или специально изготовленными щупами в виде калибров.

Угловые размеры проверяют угломерами и шаблонами.

43.3. Дефектация деталей

Металлические детали могут иметь раковины, поры, трещины и другие дефекты, появившиеся в процессе изготовления металла, полуфабриката, горячей или холодной обработки, термической или химико-термической обработки. Кроме того, дефекты могут возникнуть в процессе работы

детали в механизме. Мелкие пороки, имеющиеся в толще материала детали или на ее поверхности, в процессе эксплуатации часто развиваются, что может привести к разрушению детали и отказу механизма. Для предупреждения таких явлений некоторые детали подвергают неразрушающему контролю, позволяющему выявить подобные дефекты.

Из методов неразрушающего контроля для проверки деталей приборов используются методы дефектоскопии, а также просвечивание рентгеновскими и гамма-лучами.

Дефектоскопия окрашиванием – наиболее простой и дешевый метод обнаружения в деталях трещин, выходящих на поверхность. Этот метод основан на способности керосина проникать в мельчайшие поры и трещины. Подлежащую испытанию деталь тщательно очищают и на 10–15 мин опускают в раствор, содержащий 45 % керосина, 45 % трансформаторного масла и 10 % скипидара. Затем деталь протирают, промывают водой и окрашивают тонким слоем суспензии каолина. Высыхая, суспензия впитывает проникший в трещину раствор, по следу которого определяют наличие дефекта и его расположение.

Также раствор можно приготовить из маловязкого индустриального масла и керосина. В этом растворе деталь прогревают 15–20 мин, после чего окрашивают краской из молотого мела, разведенного водой. На высушенной краске след дефекта имеет желтый цвет.

Магнитная дефектоскопия основана на использовании потока магнитных силовых линий, возникающих в намагниченной детали, с помощью которых обнаруживаются трещины, раковины, непровары и другие дефекты, находящиеся на глубине до 6 мм. В местах дефекта поток магнитных силовых линий прерывается и рассеивается, образуя полярность. Если на намагниченную деталь нанести тонкий слой порошка из магнитного материала, например стальных опилок или кузнечной окалины, и слегка ее встряхнуть, частицы порошка расположатся соответственно направлению магнитных силовых линий, а в местах дефектов скопятся в виде холмиков.

Обычно пользуются не сухим порошком, а суспензией, приготовленной из тонкоизмельченной кузнечной окалины или прокаленной окиси железа (крокус), разведенной на трансформаторном масле с добавлением 30 % керосина.

Люминесцентный метод контроля позволяет обнаружить поверхностные трещины на деталях из немагнитных металлов. Люминесцентный контроль заключается в нанесении на поверхность детали специальной жидкости, хорошо проникающей в поры и трещины и обладающей способностью светиться под действием ультрафиолетовых лучей. Излишки жидкости удаляют с поверхности детали, после чего на нее наносят порошок, легко впитывающий остатки жидкости, находящиеся в трещинах и порах. В этих местах при облучении образуется изображение яркой светящейся линии, по своей форме соответствующей дефекту.

Просвечивание детали рентгеновскими лучами позволяет обнаружить внутренние раковины, трещины и другие дефекты. Этот метод позволяет получить фотографическое изображение детали с имеющимся дефектом. Контроль основан на способности рентгеновских лучей проходить через металлы и сплавы. В местах дефектов, где целостность металла нарушена, прохождение лучей сопровождается их меньшим ослаблением, в результате облучение фоточувствительного материала или люминесцентного экрана на этих участках будет большим и на пленке или экране возникает изображение контура дефекта.

43.4. Диагностирование приборов

Задачи диагностики сводятся к тому, чтобы без разборки или с минимальной разборкой сборочных единиц по диагностическим признакам установить наличие неисправностей в деталях или элементах прибора, определить причины их возникновения и возможные последствия.

Диагностические признаки могут быть простыми, содержащими информацию о дефектах одной детали или одного сопряжения, и комплексными, содержащими информацию о дефектах сборочной единицы или изделия в целом. Так, простыми признаками являются внешний вид деталей, их размеры, биение или деформация подвижных частей, температура узлов; комплексными – снижение производительности, увеличение удельного расхода мощности, изменение рабочих параметров и т. п.

Диагностические признаки характеризуются вполне определенными геометрическими или физическими параметрами, по изменению которых судят о надежности и работоспособности прибора. Параметры обслуживающий персонал устанавливает субъективно: на основании опыта работы с приборами, или объективно: посредством их измерения универсальными или специальными приборами. На основании диагностических данных делается вывод о возможности дальнейшего использования прибора и уточняется объем работ, подлежащих выполнению при технических осмотрах и различных видах ремонта.

Методы диагностики, а также технология и техника устранения дефектов для каждого вида приборов приводятся в ведомственных инструкциях и руководствах по эксплуатации.

Оценка состояния приборов дается по результатам внешнего осмотра, наличию шумов и вибраций, степени нагрева узлов, качеству выполняемых операций.

Внешним осмотром устанавливают чистоту деталей и узлов, целостность защитных покрытий, комплектность, правильность сборки, натяжение ремней и цепей и степень их износа, наличие смазки и исправность смазочных устройств, точность фиксации рукояток управления, исправность ограждений и блокировок, степень износа рабочих органов, целостность контура заземления и т. п.

Шум и вибрация в приборах возникают от динамических нагрузок. В каждом исправном узле шум характеризуется определенными частотными характеристиками и при соответствующей тренировке легко отличается обслуживающим персоналом от других шумов.

По мере изменения размерных и других рабочих параметров деталей вследствие их износа, а также при недостаточной или некачественной смазке шум в узлах усиливается и переходит в стук. Простейшими приспособлениями для прослушивания приборов являются стетоскоп или металлический стержень, один конец которого прикладывают к узлу, другой – к уху.

Вибрации определяют на ощупь или измеряют виброскопом. Появление ощутимых вибраций свидетельствует о значительном увеличении зазоров в подвижных сочленениях, перекосе осей валов или других дефектах. Вибрации создают дополнительные нагрузки на узлы и средства крепления и могут вызывать различные поломки.

Нагрев узлов трения и рабочих органов происходит в результате перехода части расходуемой механической энергии в тепловую. Нагрев узлов, работающих без притока тепла, допускается до 50 °С, а при использовании теплоустойчивых смазок – до 80 °С. При более высоких температурах возможен аварийный износ деталей вследствие нарушения режима смазки.

Для узлов, работающих при повышенных температурах, предельные рабочие температуры устанавливаются особо.

Нагрев узлов измеряют термометрами различных типов или определяют на ощупь, руководствуясь тем, что рука длительное время выдерживает температуру около 50 °С.

Перегрев узлов может быть вызван неправильной подгонкой поверхностей трения, перекосом деталей, уменьшением посадочных зазоров, повышенными удельными нагрузками, применением несоответствующих смазок.

Качество выполняемых операций снижается по мере износа рабочих органов приборов.

Глава 44. ОРГАНИЗАЦИЯ РЕМОНТА

44.1. Характер износа. Виды износа и защита от них

44.1.1. Износ нормальный и аварийный

Нормальным износом называют изменения размеров деталей, свойств их материалов, происходящие в условиях исправного состояния и правильной эксплуатации оборудования. Интенсивность нормального износа обусловлена главным образом конструктивными особенностями частей, износостойкостью использованных материалов, условиями эксплуатации, качеством технического обслуживания, монтажа и ремонта.

При определенных неблагоприятных условиях нормальный износ переходит в аварийный.

Аварийным износом называют изменения размеров деталей и свойств их материалов, произошедшие в относительно короткий срок вследствие неправильной эксплуатации оборудования или некачественного технического обслуживания, монтажа или ремонта.

44.1.2. Основные виды износа

К основным видам износа относят *коррозию* металлов, которую по условиям и характеру протекания процесса подразделяют на химическую и электрохимическую. *Химическая* коррозия возникает при непосредственном соприкосновении металла со средой, не проводящей электричества: воздухом, дымовыми и другими газами (при условии невыпадения из них влаги), смазочными маслами. Процесс окисления в газовой среде, содержащей кислород, протекает сравнительно быстро, однако образующиеся на поверхности металлов пленки окислов препятствуют дальнейшей реакции окисления. Лучшими защитными свойствами обладают пленки, образующиеся на цветных металлах и нержавеющей стали.

Электрохимическая коррозия возникает при соприкосновении металла с жидкостями, проводящими электричество, – электролитами.

Защиту металлов от коррозии осуществляют нанесением защитных покрытий, уменьшением агрессивности контактирующей с металлом среды или электрохимическими способами.

Усталостный износ наблюдается у деталей, подверженных многократному действию знакопеременных или меняющихся по величине однозначных нагрузок. Под их воздействием во внешних слоях материала деталей возникают касательные напряжения, которые являются причиной образования поверхностных микротрещин. Последние разрастаются и переходят в макротрещины, вызывая разрушение (поломку) детали.

Абразивный износ – разрастание поверхностей деталей мельчайшими частицами более твердых материалов – абразивов. В узлах трения приборов абразивами являются частицы металлов и их окислов, отделяющиеся с рабочих поверхностей в процессе их изнашивания: продукты окисления смазок; частицы минералов и металлов, попадающие извне (песок, стружка и др.). Попадая на поверхность трения, абразивы подвергают их микропластической деформации или срезают с поверхностей тончайшие стружки. Процесс механического разрушения сочетается с интенсивными окислительными процессами, так как при этом разрываются или отделяются поверхностные окислительные пленки.

Эрозия – механическое разрушение (размывание, разъедание) поверхностных слоев материала деталей перемещающимися с большой скоростью частицами газообразной, жидкой или твердой среды. Скорость разрушения прямо пропорциональна кинетической энергии движущихся частиц и шероховатости разрушаемой поверхности. Эрозия сопровождается интенсивными окислительными процессами.

Износ, вызываемый действием высоких температур (тепловой), характеризуется интенсивной коррозией и образованием трещин, быстро проникающих в толщу металла.

44.2. Основные виды работ по техническому обслуживанию и ремонту приборов

Системой технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) приборов называется совокупность взаимосвязанных средств, документации ТО и Р и исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления исправности средств измерения.

Основной задачей системы ТО и Р является сохранение работоспособности приборов при оптимальном сроке их службы за счет своевременного и качественного ТО и Р при минимальных трудовых и материальных затратах.

Плановый осмотр – вид планового технического обслуживания, выполняемый с целью подготовки к ремонту, проверки состояния всех узлов приборов и получения информации об износе деталей и изменении характера их сопряжений. Выполняется по заранее намеченному плану через установленное нормами системы ТО и Р количество оперативного времени, отработанного приборами. По результатам осмотра могут быть устранены мелкие неисправности.

В процессе эксплуатации приборы подвергаются износу, поэтому постоянно возникает необходимость в их ремонте для поддержания или восстановления производительности и технологической точности. Рациональное техническое обслуживание замедляет процесс износа приборов и сокращает количество отказов и связанные с ними потери основного производства.

О постепенном приближении предельного состояния деталей можно судить по признакам, обнаруживаемым визуально, инструментальными замерами или с помощью специальной аппаратуры (увеличение износа, отдельные повреждения, усталостные трещины и т. д.). Возможность прогнозировать приближение предельного состояния деталей позволяет заменять их профилактически в плановом порядке. Приближение отказа ряда деталей не сопровождается видимыми признаками и не может быть обнаружено до наступления отказа. Замена их возможна только в неплановом порядке по потребности.

Поэтому по способу организации система ТО и Р предусматривает проведение ремонта двух видов: планового и непланового. *Плановый ремонт* – ремонт, постановка приборов на который осуществляется в соответствии с требованиями нормативно-технической документации; *неплановый ремонт* – ремонт, постановка приборов на который осуществляется без предварительного назначения.

По составу ремонта система ТО и Р предусматривает два вида плановых ремонтов: текущий и капитальный. *Текущий* – ремонт, выполняемый

для обеспечения или восстановления работоспособности приборов и состоящий в замене или восстановлении отдельных частей. *Капитальный* – ремонт, выполняемый для восстановления паспортных характеристик приборов с заменой или восстановлением любых их деталей и узлов, в том числе и базовых.

К комплексу работ по восстановлению работоспособности оборудования относится также аварийный ремонт. Это неплановый ремонт, вызванный низким качеством проектирования, изготовления и ремонта оборудования, а также нарушением правил его технической эксплуатации.

Техническое обслуживание – выполняемый комплекс операций, позволяющих поддерживать приборы в постоянной работоспособности. Целью технического обслуживания приборов является предупреждение их повышенного износа путем обеспечения режимов работы согласно паспортным данным, регулярной и качественной смазки, регулирования, своевременного обнаружения и устранения неисправностей, разработки и внедрения мероприятий, направленных на совершенствование системы ТО.

Операции по ТО оборудования должны проводиться в соответствии с правилами технической эксплуатации приборов, в основном в нерабочее время работы (во время отдыха рабочего или в его отсутствие).

44.3. Методы планирования и организации ремонтов

44.3.1. Планирование ремонтов

Различают несколько методов планирования ремонтов – стандартный, периодический и послеосмотровый.

Метод *стандартных* ремонтов предусматривает проведение ремонта по истечении установленного планом количества часов эксплуатации оборудования, при этом в процессе ремонта производят замену деталей и выполняют другие работы, предусмотренные данным видом ремонта, независимо от степени износа узлов.

Метод *периодических* ремонтов предусматривает проведение плановых ремонтов, требующих продолжительного отключения приборов после завершения предприятием производственного цикла. Метод *послеосмотровых* ремонтов заключается в том, что даты проведения и объем очередных ремонтов устанавливаются на основании результатов технических осмотров приборов, осуществляемых при межремонтном техническом обслуживании.

44.3.2. Организация ремонтных работ

В ремонтных мастерских в зависимости от их технической оснащенности и объема работ используют различные методы организации ремонтных работ или их комбинации.

Метод *индивидуальных* ремонтов заключается в том, что подготовка к ремонтным работам и их исполнение ведутся отдельно по каждому изделию. Ремонтные детали и сборочные единицы изготавливаются по индивидуальным чертежам и заказам и при сборке подгоняются по месту их расположения.

Этот метод неизбежен при единичных ремонтах малораспространенных приборов.

Метод *узлового* ремонта состоит в том, что в процессе выполнения ремонта непригодные и подлежащие восстановлению части и сборочные единицы заменяются исправными из ремонтного фонда.

Метод узлового ремонта является основным при текущем ремонте, так как позволяет значительно сокращать сроки выполнения работ, улучшать их качество, специализировать труд исполнителей.

Метод *поточного* ремонта предусматривает выполнение работ на поточной линии ремонтного предприятия с предельной специализацией рабочих мест, технологического оборудования и оснастки, что обеспечивает наиболее высокую производительность труда. Однако организация поточного ремонтного производства требует значительных капиталовложений и оказывается целесообразной только при больших партиях однородных приборов, поступающих на ремонт.

44.4. Ремонтные чертежи

Ремонтный чертеж является конструкторским документом, который разрабатывают на основании рабочих чертежей для изготовления деталей.

На ремонтном чертеже в обязательном порядке должны быть приведены изображение восстановленной детали, технические требования к ней, спецификация ремонтного сборочного чертежа, таблица дефектов с указанием способов их устранения, условия и перечень дефектов, при которых деталь не принимают на восстановление, рекомендуемый основной технологический маршрут восстановления. При необходимости на ремонтных чертежах приводят указания по базированию и таблицы категорийных ремонтных размеров.

В технических требованиях указывают: допустимые отклонения размеров, шероховатость восстановленных поверхностей, разброс твердости, допустимость наличия пор, раковин и отслоений, прочность сцепления нанесенного слоя и других параметров, обусловленных применением того или иного способа, а также допуска расположения поверхностей, которые должны быть выдержаны в процессе восстановления.

Таблица дефектов, располагаемая на поле ремонтного чертежа, содержит:

- перечень дефектов, при наличии которых деталь подлежит восстановлению, а также указания по величине этих дефектов;
- коэффициенты повторяемости дефектов;
- основной и допускаемые способы устранения дефектов.

При восстановлении деталей способами сварки, наплавки, напыления и др. указывают наименование, марку, размеры используемого материала, защитную среду.

Ремонтные чертежи разрабатывают в две стадии: для опытного (литера РО) и для серийного восстановления деталей (литера РА). На ремонтном чертеже одновременно допускается указывать несколько вариантов восстановления одних и тех же элементов детали с соответствующими пояснениями. На каждый принципиально отличный вариант восстановления детали (например, на пластическую деформацию, заливку жидким металлом и др.) выполняют отдельный ремонтный чертеж. В обозначение этих ремонтных чертежей через тире добавляют римскую цифру I, II или III (соответственно для первого, второго и последующих вариантов восстановления). При этом первый вариант является основным.

Глава 45. ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА

45.1. Схема технологического процесса ремонта

Схема технологического процесса ремонта разрабатывается для каждого наименования приборов с учетом их конструктивных особенностей. Ниже приводится общий вид схемы капитального ремонта приборов в цехах ремонтного предприятия.

1. Демонтаж на объекте (выполняется при наличии акта на ремонт) и доставка приборов на ремонтное предприятие.

2. Наружная очистка путем обдувки сжатым воздухом и промывки моющим раствором.

3. Дефектация путем внешнего осмотра и апробирования в действии для оценки общего состояния и проверки взаимодействия сборочных единиц.

4. Разборка изделия на сборочные единицы.

5. Дефектация сборочных единиц путем их испытаний на стендах с измерением рабочих характеристик (выполняется по мере необходимости). Сборочные единицы, не требующие ремонта, направляются на участок комплектации.

6. Разборка сборочных единиц на детали.

7. Промывка деталей моющим раствором с последующей сушкой.

8. Дефектация деталей, определение вида и способа их ремонта. При дефектации детали подразделяют на три категории:

1) годные для использования без ремонта (направляются непосредственно на комплектацию или в ремонтный фонд);

2) требующие ремонта (направляются в соответствующие цеха или на участки предприятия с указанием способа ремонта);

3) подлежащие выбраковке ввиду непригодности к ремонту.

При дефектации детали обычно маркируют краской соответственно зеленого, желтого и красного цвета.

9. Ремонт деталей, контроль качества ремонта.
10. Промывка и сушка деталей перед сборкой.
11. Комплектование деталей на участке комплектации.
12. Сборка сборочных единиц.
13. Регулировка, испытания и обкатка сборочных единиц.
14. Окраска и сушка сборочных единиц.
15. Сборка изделия.
16. Регулировка, испытания и обкатка изделия.
17. Окраска и сушка изделия.
18. Консервация и сдача изделия на склад готовой продукции.

На всех стадиях технологического процесса службы ОТК контролируют качество выполненных работ.

На основании схемы технологического процесса разрабатываются маршрутная карта ремонта изделия и операционные карты.

45.2. Инструмент и приспособления для проверки и ремонта

Для выполнения проверки в процессе ремонта наиболее часто применяются следующие универсальные средства измерения и инструменты:

- уровни;
- индикаторы;
- меры длин концевые плоскопараллельные;
- микрометры;
- нутрометры микрометрические;
- глубиномеры индикаторные;
- линейки поверочные;
- угольники поверочные 90°;
- щупы;
- микроскопы инструментальные.

Кроме того, используются многочисленные стандартизированные и не стандартизированные инструменты, изготавливаемые централизованно для нужд ремонта или предприятиями для собственных нужд.

45.2.1. Плоскостной поверочный инструмент

В качестве контрольного инструмента при шабрении и выверке плоскостей используется поверочный инструмент, представляющий собой металлическую (чугунную или стальную) деталь, одна или несколько плоскостей которой обработаны с такой степенью точности и чистоты, что могут служить эталонами при выравнивании изношенных поверхностей ремонтируемого оборудования.

Весь применяемый при ремонте плоскостей инструмент можно разделить на универсальный и специальный. Применяемый в практике ремонта универсальный поверочный инструмент делится на линейки и плиты.

45.2.2 Приспособления для выполнения проверок

Кроме инструмента для выполнения проверок используются специальные приспособления, применяемые для проверки взаимной параллельности, взаимной перпендикулярности, правильности взаимного положения осей (или перемещения узлов), узлов и деталей по отношению к узлам.

Для проверки взаимной перпендикулярности плоскостей детали, перпендикулярности плоскости детали к оси узла, взаимной перпендикулярности осей узлов применяется группа приспособлений, разделяющихся на два вида: жесткие приспособления и приспособления с устанавливаемой плоскостью.

К жестким приспособлениям относятся угольники, цилиндрические угольники, кубы. Угольники применяются двух видов: плоские и с широким основанием. Цилиндрический угольник изготавливается из стальной трубы, закаленной и доведенной с точностью до 0,004 мм на всей длине. Преимущества цилиндрического угольника – простота изготовления и ремонта, устойчивость во время работы, жесткость конструкции. Куб представляет собой чугунную отливку. Все его стороны отшлифованы и взаимно перпендикулярны в пределах 0,002 мм на длине 300 мм. Кубом можно пользоваться во всех случаях, когда следует проверить перпендикулярность поверхностей деталей или узлов в горизонтальной или вертикальной плоскостях, а иногда и в обеих плоскостях одновременно.

Приспособления с установленной плоскостью позволяют материализовать плоскость, перпендикулярную к оси вращения шпинделя или другой детали, что упрощает выверку взаимной перпендикулярности осей или поверхностей элементов прибора в различных практических задачах.

45.3. Общие сведения о разборке приборов

Последовательность и способы выполнения сборочных и разборочных операций для каждого прибора указываются в схемах технологического процесса и операционных картах. Схемы сборки могут быть использованы в качестве схем для разборки, если выполнять операции в обратной последовательности.

Для дефектации и ремонта не все сборочные единицы разбирают полностью. Так, не подлежат разборке без особой надобности соединения деталей, выполненные сваркой, пайкой или с применением прессовых посадок, а также соединения неответственных деталей (штифты, шпильки и резьбовые штуцеры с корпусами и т. п.), не требующие проверки.

Детали, изменение положения которых в сборочной единице недопустимо, подлежат клеймению. Знаки наносятся стальными клеймами (цифрами, буквами, керном), кислотой или краской. Располагают знаки на смежных деталях таким образом, чтобы при правильной сборке они находились рядом и читались с одной стороны. Обязательному клеймению

подлежат невзаимозаменяемые детали, используемые с индивидуальной сборочной подгонкой на месте (притирка, шабрение), а также детали, работающие в процессе эксплуатации механизма и не подлежащие замене при ремонте, например, втулки подшипников скольжения и сопрягаемые с ними шейки валов.

45.3.1. Специальное оборудование для разборочных и сборочных работ

В условиях ремонтных цехов разборку приборов и сборочных единиц выполняют на слесарных верстаках, специальных стендах или в кантователях, позволяющих придавать объекту ремонта положение, наиболее удобное для выполнения необходимой операции.

Для разъединения и соединения деталей, имеющих прессовые посадки, используют винтовые и гидравлические съемники, а также прессы различных конструкций.

При разборке прессовых соединений съемником или прессом применяют подкладки из мягких металлов (алюминий, латунь), молотки используют с наконечниками из мягких материалов. Все это предохраняет детали от повреждений.

45.3.2. Нагрев и охлаждение деталей при разборке и сборке

Нагреванием охватывающих и охлаждением охватываемых деталей изменяют их сопрягаемые размеры, что значительно облегчает процесс разборки или сборки деталей. В зависимости от требуемой температуры нагрев деталей при сборке осуществляют в машинном масле (до 150–200 °), глицерине (до 320–350 °С) либо в печи. Нагрев деталей в печи во избежание образования окалины производят в восстановительной атмосфере. При разборке охватывающие детали нагревают путем обдува перегретым паром или полива горячим маслом. Для углеродистых сталей предельная температура нагрева не должна превышать 450 °С.

К охлаждению охватываемых деталей прибегают в тех случаях, когда нагревом охватываемой детали невозможно получить необходимый сборочный зазор или когда нагрев этой детали недопустим. Для охлаждения используют преимущественно сухой лед или жидкий азот.

45.4. Общие сведения о технологии ремонта

Детали, вышедшие из строя, в ряде случаев могут быть восстановлены и вновь поставлены в прибор.

Применяются три способа восстановления изношенных деталей:

1) восстанавливаются геометрическая форма и чистота поверхности (при этом, как правило, изменяются размеры детали);

2) изношенные поверхности сначала наращиваются с целью компенсации износа, а затем обрабатываются до номинальных размеров;

3) комбинируются оба способа: при этом изношенная поверхность одной детали наращивается с целью компенсации изменения размеров сопрягаемой детали, восстанавливаемой только обработкой. Этот способ восстанавливает также и взаиморасположение деталей.

Кроме изношенных деталей, восстанавливаются также поломанные и деформированные детали.

Для ремонта деталей применяются следующие методы восстановления: обработка ручная или механическая (шабрение, опиловка, рубка, точение, строгание, шлифование, фрезерование и т. д.);

сварка (газовая, жидким металлом, дуговая, электрошлаковая);

наплавка (дуговая, газовая, электровибрационная, электрошлаковая, плазменная);

электролитические методы наращивания (хромирование, никелирование, осталивание);

доотливка отломившихся частей;

заливка (баббитом, бронзой, эпоксидными составами);

наращивание самотвердеющими пластмассами;

электромеханическое увеличение размера;

изменение конструкции детали (надевание рубашек, гильзование, крепление накладок, вмонтирование хвостовиков, изменение размеров резьбы и т. д.);

уплотнение выявившихся рыхлостей;

правка.

При выборе метода восстановления деталей большое значение имеет экономическая эффективность. Выгодным представляется тот метод, который полностью восстанавливает техническую характеристику детали, при этом стоимость восстановления ниже стоимости изготовления новой детали, а сроки восстановления короче.

Метод изменения размеров поверхностей не всегда приемлем, так как часто влечет за собой необходимость изготовления новой сопряженной детали. В некоторых случаях уменьшение размеров недопустимо из условий прочности. При наращивании изношенной поверхности иногда экономически выгодно увеличить ее против номинального размера с тем, чтобы обработать сопряженную деталь на ремонтный размер. Это дает возможность восстановить обе изношенные детали и сопряжение.

Значение фактора деформирования детали также велико, так как восстановлению подлежит старая. В подавляющем большинстве случаев деформация детали, являющаяся следствием выполнения операции восстановления, может вывести деталь из строя в результате изгиба оси или изменения размеров рабочих поверхностей, контактирующих с поверхностями сопрягаемой детали.

45.5. Восстановление размеров детали

Одним из наиболее распространенных способов восстановления геометрических параметров изношенных деталей является способ, основанный на их пластическом деформировании с последующей (в случае необходимости) механической обработкой.

При воздействии внешней силы деталь деформируется, т. е. изменяются ее форма и размеры. После снятия внешней силы деталь частично приобретает прежнюю форму и размеры. Ту часть деформации, которая не восстанавливается, называют остаточной или пластической.

Способ основан на принудительном местном перераспределении металла самой детали, в результате чего на ее ремонт не требуется дополнительного металла. При деформации нагрузки на детали превышают 500–800 МПа. Для облегчения пластического деформирования деталь предварительно нагревают. Так, например, при нагреве до температуры 900 °С давление на деталь можно снизить до 50–60 МПа.

Детали правят с помощью прессов и домкратов. Хорошие результаты дает правка деталей *местным наклепом* (рис. 45.1, а), который создает напряжения сжатия, деформирующие деталь в направлении, совпадающем с направлением наносимого удара.

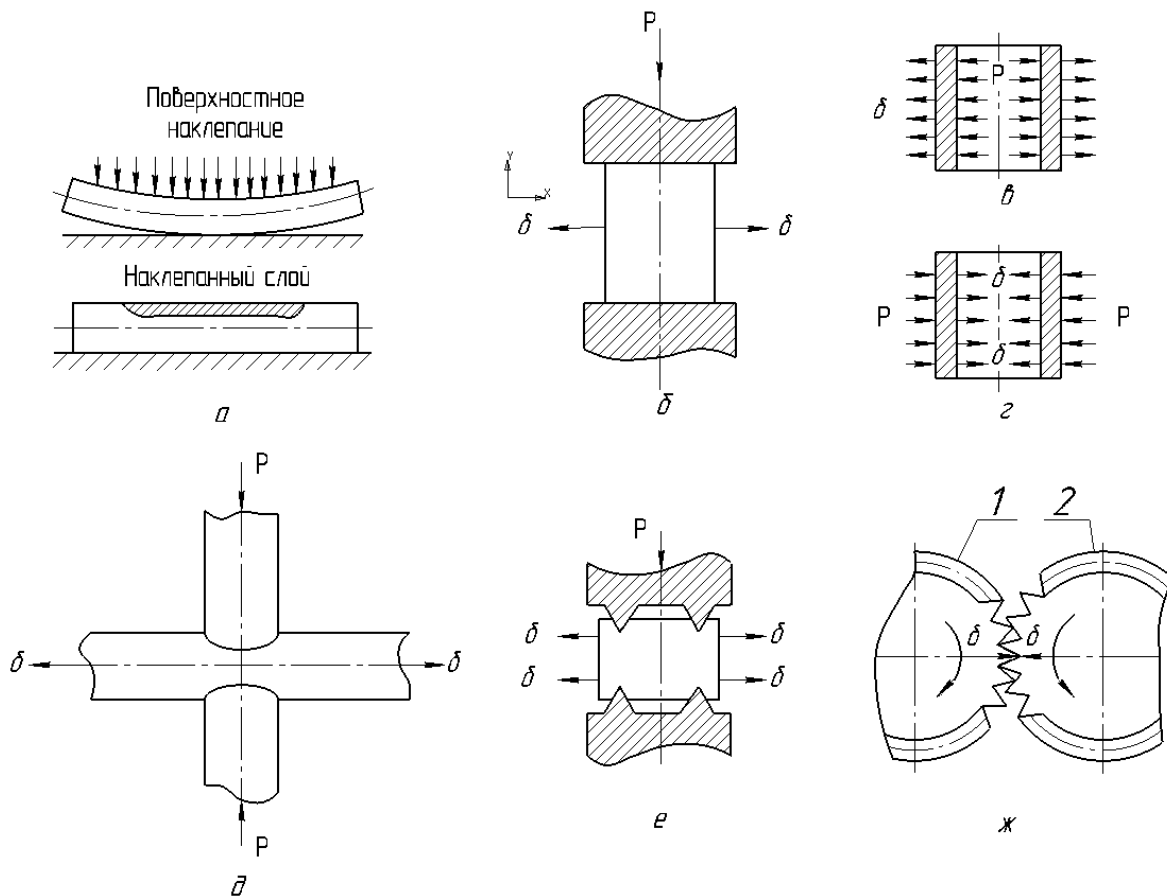


Рис. 45.1. Схемы восстановления деталей давлением:
1 – накатываемая деталь; 2 – ролик

Осадкой (рис. 45.1, б) увеличивают диаметр деталей типа пальцев и втулок из цветных металлов за счет некоторого уменьшения их длины. Этим способом можно уменьшить длину деталей до 15 %, однако ответственные детали не уменьшают больше чем на 4–8 %. При осадке направление действия внешней силы P перпендикулярно направлению деформации δ .

Раздачей (рис. 45.1, в) увеличивают наружный диаметр деталей типа пустотелых валов и втулок при незначительном изменении их длины. Для увеличения внутреннего отверстия детали через него проталкивают шарик или пуансон с большим, чем у отверстия детали, диаметром.

Обжатием (рис. 45.1, г) уменьшают внутренние размеры деталей типа втулок, изготовленных из цветных металлов. Втулку проталкивают пуансоном через установленную в подставке матрицу. Входное отверстие матрицы сужается под углом 7–8°, далее идет калибрующая часть, которая заканчивается выходным отверстием, расширяющимся под углом 18–20°. После обжатия наружную поверхность втулок протачивают, а внутреннюю развертывают.

Вытяжкой (рис. 45.1, д) увеличивают длину деталей за счет местного уменьшения их поперечного сечения. При вытяжке направление деформации перпендикулярно направлению действия внешней силы.

Вдавливанием (рис. 45.1, е) увеличивают наружные размеры детали за счет ее деформации на ограниченном участке. Этим способом восстанавливают работоспособность шлицевых поверхностей деталей типа валов. Шлицы прокатывают по направлению их продольной оси заостренным роликом, который внедряется в металл и разводит шлиц на 1,5–2,0 мм в сторону.

Накатка (рис. 45.1, ж) основана на вытеснении рабочим инструментом материала с отдельных участков изношенной поверхности детали и позволяет увеличивать диаметр накатываемых деталей на 0,3–0,4 мм. Накатке подвергают детали без термической обработки. Обработанная таким образом поверхность пригодна для посадок.

Электромеханическая обработка деталей заключается в искусственном нагреве металла электрическим током в зоне деформации. При включении резца и детали в электрическую цепь в зоне резания будет выделяться теплота, количество которой можно определить по формуле

$$Q_2 = 0,24I^2Rt,$$

где Q_2 – количество теплоты, Дж;

I – ток, А;

R – сопротивление цепи, Ом;

t – время, с.

В зоне резания металл нагревается до 800–830 °С. Такой нагрев повышает пластические свойства металла и облегчает резание. Схема электромеханической обработки приведена на рис. 45.2. При нагреве используют трансформатор, со вторичной обмотки которого можно получить ток

1000 А при напряжении 0,2–2 В. Этот способ дает возможность обрабатывать закаленные детали и детали, наплавленные твердыми сплавами. Обработанная электромеханическим способом поверхность детали обладает большей износостойкостью, чем деталь, полученная без электроподогрева.

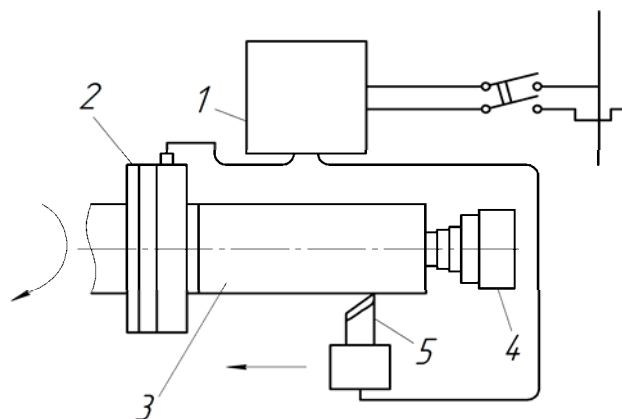


Рис. 45.2. Схема электромеханической обработки:
1 – трансформатор; 2 – патрон; 3 – деталь; 4 – задняя бабка; 5 – инструмент

Электромеханическим способом можно восстанавливать неподвижные сопряжения. Процесс состоит из двух операций (рис. 45.3): высадки металла и сглаживания выступов до необходимого размера.

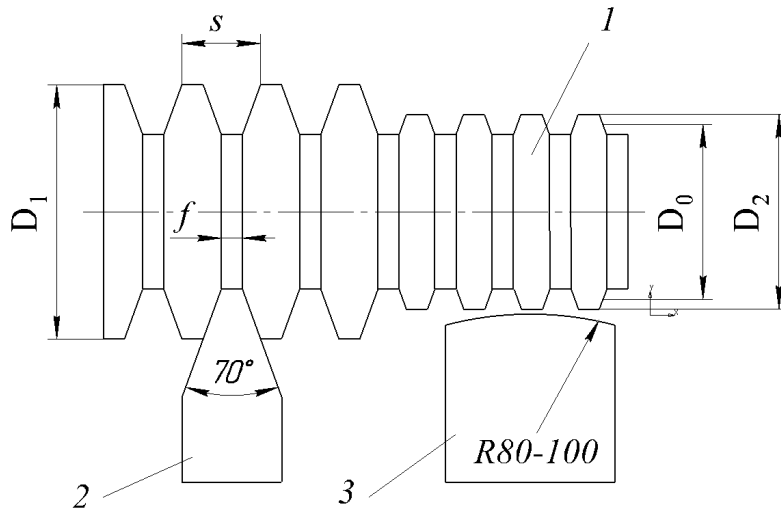


Рис. 45.3. Схема электромеханической высадки и сглаживания деталей при ремонте неподвижных сопряжений:
1 – деталь; 2 – высаживающая пластина; 3 – сглаживающая пластина;
 D_0 – диаметр изношенной детали; D_1 – диаметр детали после высадки;
 D_2 – диаметр детали после сглаживания

Металл высаживают твердосплавной пластинкой с углом в плане, равным 70° . Подача s должна быть в три раза больше контактной поверхности f пластинки. Сглаживание выступов выполняют скругленной пластинкой. Ра-

диус скругления составляет 80–100 мм; ширина пластинки в три–пять раз больше подачи. При этом способе увеличивается твердость контактной поверхности и повышается износостойкость восстановленных сопряжений.

45.6. Восстановление чистоты поверхности детали

Мелкие неисправности, выявленные на деталях механизмов во время дефектации и зафиксированные в ведомости дефектов, должны быть устранены во время ремонта.

Заусенцы, забоины, грубые риски, надиры и царапины зашлифовывают надфилем, не допуская резких переходов, и зачищают шкуркой с зернистостью 5–8. Съем металла должен быть минимальным. Продукты зачистки удаляют, протирая обработанные поверхности салфеткой, смоченной в бензине.

Забоины на резьбе болтов, винтов, шпилек, гаек устраняют, калибруя резьбу плашками или метчиками. На крепежных деталях, направляемых на сборку, обычно допускают срыв одной-двух нерабочих ниток резьбы; в этом случае заход резьбы аккуратно выправляют надфилем для обеспечения легкого наживления сопрягаемой резьбовой детали. Если в результате ремонта гальваническое покрытие резьбовых деталей значительно повреждается, покрытие восстанавливают.

Коррозия, обнаруженная на деталях, может быть удалена механическим или химическим способом. *Механическое* удаление коррозии осуществляется путем зачистки пораженных коррозией мест до основного металла с последующим удалением продуктов зачистки салфеткой, смоченной в бензине. Затем детали обдувают сжатым воздухом.

Удаление коррозии со стальных деталей *химическим способом* начинают с тщательного обезжиривания мест с коррозией и прилегающих участков поверхности с помощью салфетки, смоченной в бензине. Обезжиренные места протирают сухой салфеткой. Затем от действия кислоты предохраняют прилегающие участки поверхности, нанося на них сплошной тонкий слой нитролака. Деталь сушат в течение 30–40 мин. Многократно протирая дефектное место тампоном, смоченным кислотой с ингибитором ПБ-5, протравливают поверхность детали, удаляя с нее коррозию. В качестве травящей жидкости применяют 50–60%-й раствор ПБ-5. Ингибитор замедляет процесс растворения железа, практически не снижая растворимость ржавчины. Удалив продукты коррозии, протравленную поверхность промывают чистой водой с помощью ватного тампона. Нейтрализуют травленную поверхность 10%-м раствором пищевой соды с помощью ватного тампона и осушают поверхность сухой салфеткой. Травленную поверхность протирают кусочком фетра, затем салфеткой, смоченной в бензине и хорошо отжатой.

Непосредственно после устранения неисправностей и удаления коррозии обезжиренные поверхности необходимо защитить от атмосферных воздействий. На свободные поверхности деталей наносят слой грунтовки

(ГФ-031, АК-070) или восстанавливают всю систему лакокрасочного покрытия. На трущиеся поверхности деталей, работающих в смазке, наносят слой используемой в механизме рабочей смазки.

Кожухи, колпаки, крышки из листового материала с вмятинами подвергают правке. Правку производят рихтовочным молотком, начиная с середины вмятины и постепенно передвигаясь к краям. Деталь укладывают на покрытую твердой резиной деревянную подставку или надевают на оправку, кривизна которой близка к кривизне детали. После правки места с нарушенным покрытием зачищают шкуркой, обезжиривают поверхности и восстанавливают покрытие, используя грунтовки и эмали, предусмотренные чертежом детали.

На все отремонтированные и признанные пригодными для сборки детали механизмов наносят клеймо.

От качества комплектования, являющегося предварительной операцией процесса сборки отремонтированного механизма, зависит надежность механизма и производительность труда сборщиков. Под **комплектованием** понимают обеспечение производительной сборки изделий в соответствии с техническими условиями и чертежами работы по подбору сборочных единиц и деталей, а также материалов, составляющих механизм.

На сборку поступают частично изношенные детали: восстановленные детали и сборочные единицы:

новые детали и сборочные единицы, взятые из комплекта запасных частей;

детали, вновь изготовленные на ремонтном предприятии;

готовые изделия (микровыключатели, соединители, шарикоподшипники и т. д.);

материалы (провода, изоляционные трубки, смазки, клеи, грунтовки, эмали и т. д.).

Такое разнообразие элементов предопределяет необходимость в проведении проверок и подбора в процессе комплектования. Поскольку при ремонте стремятся к максимально возможному использованию сборочных единиц и деталей ремонтируемого механизма, то за счет подбора деталей с соответствующими действительными размерами или за счет изготовления деталей с ремонтными размерами в большинстве случаев удается избежать замены дорогостоящих деталей и сборочных единиц.

При комплектовании подлежат замене детали одноразового применения, а также сборочные единицы, детали и готовые изделия с ограниченным ресурсом. Перечни таких элементов приводятся в руководствах по ремонту конкретных механизмов. Проведение замены указанных элементов имеет целью обеспечить безотказную отработку механизмом назначенного после ремонта ресурса.

45.7. Нарращивание изношенных поверхностей и склеивание

45.7.1. Металлизация

Металлизацией называется процесс нанесения на поверхность детали распыленного расплавленного металла.

Расплавленный металл распыляется струей сжатого воздуха, сообщая мельчайшим его частицам кинетическую энергию. Благодаря этому они с большой скоростью ударяются о предварительно подготовленную поверхность детали. При ударе о твердую поверхность частицы, будучи в пластичном состоянии, деформируются и сцепляются с ней. Последующие слои сцепляются с предыдущими, и так до прекращения процесса.

Аппарат, обеспечивающий расплавление металла, распыление его и доставку к поверхности восстанавливаемой детали, называется *металлизатором*. Аппарат (рис. 45.4) действует следующим образом. С помощью протяжных роликов по направляющим наконечникам непрерывно подаются две проволоки 1, к которым подведен электрический ток. Возникающая между проволоками электрическая дуга расплавляет металл. Одновременно по воздушному соплу под давлением 0,6 МПа в зону дуги поступает сжатый газ.

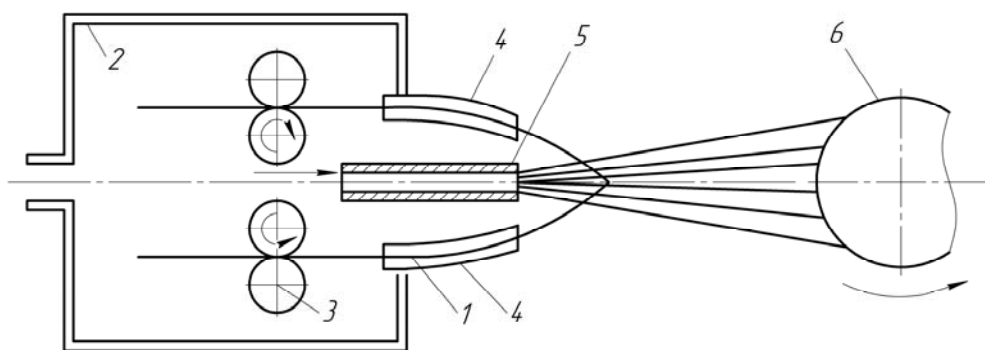


Рис. 45.4. Схема работы металлизатора:

1 – электродная проволока; 2 – провода от трансформатора;
3 – ролики; 4 – направляющие; 5 – сопло; 6 – деталь

Металлизация не вызывает деформации восстанавливаемой детали. Лучше всего восстанавливать стальные и чугунные детали, работающие на трение при спокойной нагрузке, без значительных ударов, с окружной скоростью вращения восстанавливаемых шеек до 25 м/мин. Нарращиваемый металлизацией слой может иметь толщину в пределах от 1,5 до 12 мм. Материалом для наращивания стальных и чугунных деталей служит стальная проволока. Слой металла, полученный металлизацией, представляет собой губчатую массу с заметными порами, довольно активно впитывающими масло.

Для получения хорошего сцепления наносимого слоя металла с основным важно правильно провести подготовку. Она заключается в очистке поверхности детали от жира, грязи, влаги, окислов и т. д. и создании шероховатости поверхности Ra 0,16. Очистка поверхности детали от загрязне-

ний производится химическими растворителями, песком или дробью; создание нужной шероховатости достигается механической обработкой или другими методами.

Перед металлизацией чугунных деталей следует удалить с них масло, впитавшееся в верхний слой металла. Эффективным методом удаления масла является выжигание его огнем горелки. При восстановлении тел вращения наилучшей подготовкой являются проточка и нарезка резьбы.

Металлизированная поверхность хорошо работает на износ. При металлизации возможно создание антифрикционных пар трения. Для этого применяются алюминий, медь, свинец, латунь в различных сочетаниях или в сочетании со сталью. Эти металлы подаются в металлизационный аппарат в виде двух проволок, плавятся в нем и распыляются аппаратом в виде мельчайших частиц (пылинок), которые, смешиваясь, образуют так называемый псевдосплав. Такой антифрикционный слой может успешно работать со стальными вкладышами.

Основным недостатком металлизации является хрупкость нанесенного слоя металла, вследствие чего он плохо работает при ударах и знакопеременных нагрузках. Кроме того, металлизированный слой, нанесенный на поверхность детали, не повышает ее прочность. Поэтому применять металлизацию для восстановления деталей с ослабленным сечением не следует. При восстановлении деталей, находящихся под воздействием динамических нагрузок, а также деталей, работающих при трении без смазочных материалов, необходимо учитывать, что сцепляемость напыленного слоя с основным металлом детали недостаточна.

45.7.2. Хромирование

Хромирование – это наращивание слоя хрома на поверхности детали методом гальваностегии. Оно широко применяется при ремонте. Хромирование используют для увеличения износостойкости, твердости, химической стойкости и прирабатываемости, обеспечения трения со смазочным материалом, восстановления размеров изношенных деталей, а также для декоративных целей. Осадки хрома различают по внешнему виду и по физическим и механическим свойствам. Для улучшения связи хромовых покрытий с поверхностью деталей и получения химически стойких покрытий наращивание хрома часто осуществляют на подслое из других металлов.

Хромирование основано на осаждении металлического хрома на поверхность из раствора, содержащего ионы хрома, под действием постоянного тока при определенном напряжении. Хромирование деталей осуществляется в ваннах, наполненных растворами хромового ангидрида и серной кислоты, в которые на определенном расстоянии друг от друга погружены деталь, контактирующая с отрицательным полюсом и называемая к а т о д о м, и свинцовая пластина, контактирующая с положительным полюсом и называемая а н о д о м. Раствор подогревают до температуры 40–60 °С.

Качество хромового покрытия в основном зависит от состава электролита, плотности тока, температуры электролита и интенсивности его перемешивания в ванне. Изменяя указанные элементы технологического процесса и время осаждения, получают покрытия разной толщины с различными физико-механическими свойствами и равномерностью.

Если через цепь «свинцовая пластина–раствор хромового ангидрида и серной кислоты–покрываемая деталь» (анод–электролит–катод) пропустить постоянный электрический ток определенной силы и напряжения, то на поверхности детали будет осаждаться слой металлического хрома, за счет которого изменится ее размер. Покрытие хромом увеличивает сроки службы трущихся поверхностей, так как он хорошо работает на истирание. Применение хромирования ускоряет ремонт и улучшает его качество. Хромирование не деформирует наращиваемые детали. Однако следует иметь в виду, что у деталей, покрытых электролитическим хромом, уменьшается (до 20 %) усталостная прочность.

Для восстановления трущихся поверхностей рекомендуется применять пористое хромирование, что способствует удержанию смазки. Для электролита, применяемого при получении пористого хромового покрытия, характерно соотношение

$$\frac{\text{CrO}_3}{\text{H}_2\text{SO}_4} = 95-120.$$

Для неподвижных соединений применяют гладкое хромирование. Слой хрома на трущихся поверхностях следует оставлять (после шлифования) не более 0,07–0,1 мм.

45.7.3. Химическое никелирование и железнение

Химическим никелированием называется процесс покрытия поверхностей изделий никелем, осаждение которого получается вследствие его химического восстановления из растворов, содержащих никелевые соли. Химическое никелирование дает твердые осадки из сплава никеля (92 %) с фосфором (7 %). Такое покрытие после осаждения имеет твердость 500 HV.

Химическое никелирование производят в растворах, в состав которых входят в разных соотношениях (в зависимости от рецепта) хлористый никель, гипофосфорит натрия, оксиацетат натрия или ацетат натрия, лимоннокислый натрий, серноокислый никель. Температура раствора 98–99 °С. Скорость осаждения никеля 2–25 мкм/ч.

Поверхности деталей перед химическим никелированием должны быть очищены от окалины и ржавчины, обезжирены, а непосредственно перед погружением в ванну – продекопированы.

На деталях, работающих в условиях высоких температур, и в особенности, подвергающихся при этих температурах абразивному износу, нано-

силь никелевые покрытия химическим способом не рекомендуется, так как твердость покрытия при высоких температурах (выше 400 °С) понижается.

Сплав никеля с фосфором, получаемый при химическом никелировании, хорошо притирается.

Сущность *железнения* или *осталивания* в общем сходна с другими гальваническими процессами. Электролитами здесь служат водные растворы солей железа, в качестве анодов применяют стальные пластины, катодом является осталиваемая деталь. Железнение дает возможность нарастить слой 1–2 мм.

В настоящее время в промышленности внедряется твердое осталивание, при котором наращиваются твердое железо и сплавы железо-никель и марганец-никель. Электролитом для твердого осталивания служит подогретый до 75–80 °С раствор хлористого железа. Для получения сплавов в электролит добавляются хлористый никель или хлористый марганец. Покрытие имеет твердость до 800 НВ. Такая твердость позволяет использовать восстановленные детали для работы в парах трения. Оптимальная толщина наращиваемого слоя при твердом осталивании 0,3–0,4 мм.

Преимущества процесса железнения – относительная дешевизна и высокая производительность.

45.7.4. Газопламенное нанесение порошковых материалов

Основа процесса *газопламенного нанесения* – пластификация порошка в высокотемпературном источнике тепла (ацетиленокислородном пламени) и нанесение его газовыми потоками на предварительно подготовленную изношенную поверхность.

Преимущества газопламенного нанесения состоят в высокой производительности процесса, локальности обработки, незначительном влиянии на подложку, возможности нанесения покрытий на изделия больших размеров, отсутствии ограничений на сочетания материалов покрытия и подложки, что позволяет охватить большую номенклатуру восстановления изношенных деталей.

Технологический процесс газопламенного нанесения состоит из трех этапов:

- 1) нагрева поверхности детали до 200–250 °С;
- 2) нанесения подслоя, который дает основу, необходимую для наложения основных слоев;
- 3) нанесения основных слоев, позволяющих получить покрытия с необходимыми физико-механическими свойствами.

К основным факторам, влияющим на прочность сцепления покрытия с основой, относятся:

способ подготовки поверхности и используемый при этом абразивный материал;

время выдержки после обработки;

наличие предварительного подогрева;
применение подслоя;
способ распыления;
эффективная мощность пламени;
параметры процесса распыления;
состав материала покрытия (наличие поверхностно-активных добавок в покрытии зависит и от применяемого оборудования, и от присадочных материалов).

Основой конструкции аппаратов для напыления и горелок для наплавки является базовая схема сварочной горелки, которая служит для смешивания горючего газа с кислородом и получения газового пламени.

45.7.5. Наплавка

Наплавка по сравнению с другими способами восстановления дает возможность получать на поверхности деталей слой необходимой толщины и нужного химического состава, высокой твердости и износостойкости.

При наплавке под слоем флюса в зону горения дуги подают сыпучий флюс, состоящий из отдельных мелких крупниц (зерен). Под воздействием высокой температуры часть флюса плавится, образуя вокруг дуги эластичную оболочку, которая надежно защищает расплавленный металл от действия кислорода и азота. После того как дуга переместилась, жидкий металл твердеет вместе с флюсом, образуя на наплавленной поверхности ломкую шлаковую корку.

Способ наплавки в среде углекислого газа отличается от других способов восстановления деталей тем, что здесь не нужно флюсов. Дуга между электродом и наплавляемым изделием горит в струе газа, вытесняющего воздух из плавильного пространства и защищающего расплавленный металл от воздействия кислорода и азота.

Способ дуговой наплавки с газопламенной защитой позволяет наплавлять на детали плотный слой, применяя доступные и относительно дешевые углеродистые проволоки. Металл, наплавленный высокоуглеродистыми проволоками на стальные детали, хорошо воспринимает закалку. Металл можно также наплавлять стальной низкоуглеродистой проволокой на чугунные детали. Наплавленный слой в этом случае обладает хорошей обрабатываемостью.

Особенностью способа является то, что защитные газы в сварочную зону подаются двумя концентрированными потоками (рис. 45.5): в наружном потоке — природный газ, а во внутреннем — кислород. При этом природный газ и продукты его сгорания защищают сварочную зону от проникновения азота из воздуха. Однако при сварке углеводородный газ вызывает обильную пористость. Вредное влияние газа на плотность наплавленного металла подавляется кислородом, который узким внутренним потоком подается в зону дуги.

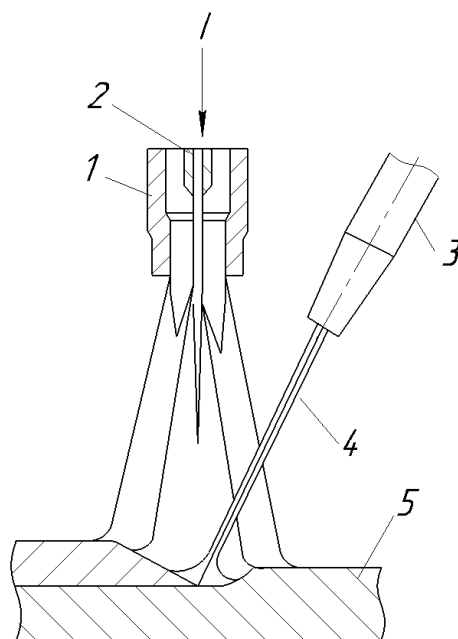


Рис. 45.5. Схема наплавки с газопламенной защитой:
 1 – сопло для природного газа; 2 – сопло для кислорода;
 3 – мундштук; 4 – проволока; 5 – деталь

45.7.6. Плазменное напыление композиционных порошковых материалов

Плазменное напыление состоит из твердой тугоплавкой основы и легкоплавкой связки.

Плазменные покрытия используют для создания износостойких слоев на рабочих поверхностях деталей, подверженных трению. Состав композиций подбирают, исходя из общей оценки условий работы поверхности, в том числе с учетом возможности отвода теплоты, свойств сопрягаемых материалов трущейся пары, требований к качеству поверхности и точности ее начальных размеров и т. п.

Сущность метода состоит в бомбардировке обрабатываемой поверхности частицами порошка, разогретыми до пластического состояния. Передачу тепловой и кинетической энергии частицам порошка осуществляют *плазменным* (за счет введения порошковых материалов в плазменную струю) и *газопламенным* (с введением порошков в газовую смесь) способами.

Недостатками плазменно напыленных покрытий являются низкая прочность сцепления с основой, адгезионная прочность и термостойкость покрытия, что связано с различными коэффициентами температурного расширения покрытия в основе. Обладая значительной пористостью плазменно напыленные покрытия не защищают поверхность от окисления, что приводит к ускоренному разрушению (отслаиванию) покрытия.

Увеличить адгезионную прочность, термостойкость и стойкость покрытия в окислительных средах можно следующим способом. На металли-

ческую поверхность изделия напылением наносят порошковое покрытие, а затем любым из известных способов эту поверхность подвергают азотированию до образования нитридной прослойки.

Так как порошковое покрытие пористое, то оно не препятствует диффузии атомов азота к поверхности защищаемого металла. Наоборот, за счет усиления адсорбционных и абсорбционных процессов ускоряются насыщение поверхности азотом и образование на ней нитридов тех элементов, которые входят в состав защищаемого металла (железа, хрома, вольфрама, титана, алюминия и др.). Поскольку нитриды имеют плотность, меньшую, чем металлы (плотность оксидов – 3–5 г/см³, а плотность стали – 7,8 г/см³), то при образовании нитриды заполняют микропоры порошкового покрытия, увеличивая тем самым сцепляемость по типу механического зацепления. Одновременно повышается термостойкость покрытия, так как образовавшиеся нитриды играют роль прослойки с коэффициентом термического расширения, близким к порошковым материалам на основе оксидов. Нитридная прослойка обеспечивает также коррозионную стойкость защищаемого металла.

45.7.7. Нанесение эпоксидных составов и наращивание акрилопластами

Эпоксидные составы применяются как масса для футеровки внутренних поверхностей цилиндров, работающих с манжетами в условиях высокой температуры. Восстановление таким методом может повторяться неоднократно. Наращивание производится на токарном станке центробежным способом. Для восстановления в размер (без последующей обработки) станок должен быть точным. Деталь, подлежащая наращиванию, должна быть тщательно промыта и обезжирена; желательна, чтобы поверхность имела шероховатость $Rz = 40\text{--}80$ мкм. С обоих торцов детали ставят заглушки. Заглушки следует предохранять от прилипания смол, для чего их покрывают тонким слоем масла или приклеивают пленки полихлорвинила. Восстанавливаемая деталь устанавливается на станок. Если для принятого состава необходима определенная температура, то деталь подогревают с помощью электрического прибора. Эпоксидный состав, предварительно приготовленный и подогретый, заливается внутрь цилиндра через воронку, вставленную в отверстие заглушки. Число оборотов детали зависит от размера внутреннего диаметра цилиндра и используемого состава смолы. Наращиваемый слой может иметь толщину 0,5–5,0 мм. Оптимальный слой наращивания 2–3 мм.

Для наращивания изношенных поверхностей применяются пластмассы на основе акриловых смол – *акрилопласты*, которые представляют собой самотвердеющие пластмассы, принимающие нормальную твердость при комнатной температуре и атмосферном давлении. Благодаря своим хорошим технологическим и эксплуатационным качествам они в последние

годы заняли ведущее место среди материалов, используемых для восстановления изношенных поверхностей многих базовых и корпусных деталей. Пластмасса составляется из порошка (полимера) и жидкости (мономера) путем их смешивания. При этом образуется жидкая, довольно текучая, быстро затвердевающая масса. Акрилопласты обладают достаточной твердостью, хорошо работают на истирание, надежно сцепляются с грубо обработанной поверхностью деталей. При толщине наносимого слоя в 3–4 мм легко обрабатываются, не реагируя на минеральные масла.

Приготовление акрилопластов для наращивания поверхностей заключается в смешивании порошка и жидкости в соотношении от 1:0,75 до 1:2. Смешивание должно вестись в чистой посуде до получения однородной массы в стадии набухания (когда в массе начинают появляться тянущиеся нити). Массу следует готовить непосредственно перед заливкой, когда восстанавливаемые детали уже подготовлены. Заливаемые поверхности должны быть обезжирены (ацетоном, спиртом, бензином, мономером). При механической обработке поверхности под заливку следует обработать с чистотой $Ra = 0,16$ мкм. Рекомендуется также на обезжиренной поверхности углом режущей кромки зубила делать насечку (в виде запытых). В ответственных случаях у края детали просверливают отверстия, которые должны заполнить заливаемая масса. Когда имеется опасность появления значительных сдвигающих усилий, на кромке детали просверливают и нарезают отверстия (резьба М6, М8), в которые ввинчивают бронзовые шпильки. Концы шпилек после заливки поверхности должны утопать на 1–1,5 мм. На больших поверхностях шпильки устанавливают в шахматном порядке в два или три ряда.

45.7.8. Склеивание деталей

Применение клеев при ремонте оборудования все расширяется. Они используются для создания неразъемных соединений деталей из металла или из металла и других материалов. Клеем можно восстановить неподвижную посадку, а клеевые пасты (с наполнителями) используются для заделки задиров, склеивания трещин, вклейки вставок, приклейки накладок из пластмасс.

Из известных в настоящее время клеев наиболее перспективными для ремонта являются *эпоксилаты* – композиционные пластмассы, изготавливаемые на основе эпоксидных смол. Их основой служат смолы ЭД-5, ЭД-6, ЭД-40, ЭД-41. В композицию входят также различные отвердители, пластификаторы и наполнители. Пластификатор уменьшает хрупкость и повышает ударную вязкость композиции. В качестве отвердителей используются малеиновый ангидрид, полиэтиленполиамин и др. Наполнители выравнивают коэффициент термического расширения клея.

Подготовка поверхностей под склеивание заключается в их очистке обычными способами от грязи и масла и в грубой обработке. Склеиваемые

поверхности должны плотно прилегать друг к другу. Склеенные детали выдерживаются при комнатной температуре 24 ч. Подогрев склеиваемых деталей ускоряет процесс полного отверждения клея: при подогреве до 60 °С достаточно 5 ч выдержки, при подогреве до 120 °С – 2 ч.

Большое распространение для ремонта имеет и *карбинольный* клей. Он готовится из карбинольного сиропа и перекиси бензоила в соотношении 100:3. Если к клею прибавить цемент или технический тальк в количестве 50–100 % вес. ед. карбинольного сиропа, то получится карбинольный клей – цемент.

Наряду с карбинольным клеем применяются универсальные клеи БФ-2 и БФ-4. Эти клеи затвердевают быстрее карбинольного. Для окончательного затвердевания склеенные детали должны быть подогреты до температуры 140–160 °С. Прочность соединений, обеспечиваемая клеями типа БФ, несколько ниже, чем прочность соединений, полученных карбинольным клеем.

Кроме перечисленных клеев в ремонтной практике применяются клеи ВС10Т и ВС350, которые обладают хорошей адгезией к металлам, неметаллическим материалам и, кроме того, весьма теплостойки.

45.8. Изменение конструкции деталей

В ряде случаев восстановление изношенной детали возможно лишь при условии изменения ее первоначальной конструкции. Такие изменения возможны, если они не ухудшают работу детали, узла и прибора в целом.

45.8.1. Надевание «рубашек»

Нарушенное сопряжение можно восстановить путем надевания на изношенную поверхность детали так называемых рубашек. Если из условий прочности это допустимо, изношенная поверхность протачивается на меньший размер и на эту поверхность насаживается втулка – рубашка, обычно изготавливаемая из стали. Перед напрессовкой рубашку нагревают в масляной ванне. Толщина стенки рубашки и натяги должны быть такими, чтобы при насадке не оставались остаточные деформации. Крепление рубашек осуществляют либо путем установки болтов и штифтов, либо их обваркой с торцов. Допустимо приклеивание рубашек.

45.8.2. Гильзование

Геометрическую форму и размеры изношенных цилиндрических отверстий в деталях восстанавливают растачиванием с последующей установкой гильз (втулок). Этот метод применяется тогда, когда толщина стенок детали достаточна для растачивания без нарушения ее прочности и жесткости. Втулки могут быть изготовлены из стали, чугуна и цветных металлов. Они закрепляются стопорными винтами или ставятся на клей.

В отдельных случаях втулки приваривают по торцам. Для облегчения установки гильзы (втулки) и обеспечения необходимого натяга применяют охлаждение или нагрев охватываемой детали.

45.8.3. Применение накладок

Для компенсации износа трущихся плоскостей применяют накладки. Для этого ремонтируемую поверхность обрабатывают на размер, компенсирующий износ и минимальную толщину накладки. В качестве накладок могут быть использованы различные металлические и неметаллические материалы: сталь, чугун, бронза, текстолит, капрон и т. д. Накладки могут крепиться винтами или приклеиваться.

Накладки в большинстве случаев улучшают конструкцию, так как выполняют роль компенсаторов износа, а при очередном ремонте упрощают восстановление узла. Капрон, акрилопласты, бронза работают на трение по чугунным направляющим при обычной смазке лучше, чем чугун основной детали, т. е. удлиняют срок службы узла. Кроме того, накладки применяются в качестве крепящих деталей, когда необходимо связать воедино деталь, получившую трещину, или деталь, у которой отломалась какая-то часть. Таким образом деталь с трещиной может быть предохранена от дальнейшего разрушения. В ряде случаев механическое крепление накладкой или планкой на длительное время восстанавливает работоспособность ответственной дорогостоящей детали.

45.8.4. Восстановление резьб

В чугунных деталях восстановление крепежных резьб можно производить только заменой данной резьбы другой, большей по размеру. При этом если новая резьба имеет тот же шаг, что и исправляемая, отверстия иногда не рассверливают, а лишь нарезают резьбу метчиком следующего размера. Если же шаг резьбы следующего размера не совпадает с шагом ранее нарезанной резьбы, отверстие приходится рассверливать, а затем нарезать новую резьбу. В стальных деталях резьба не выкрашивается, поэтому ее часто исправляют прорезкой с помощью метчика того же размера. Когда этого недостаточно, приходится применять такие же методы, как в чугунных деталях, или заваривать отверстие электросваркой, а затем просверливать новое отверстие и нарезать резьбу. Если же все описанные выше методы почему-либо неприменимы, приходится сверлить отверстия и нарезать резьбу в других местах, заглушив или заварив (а иногда и оставив) старые резьбовые отверстия.

45.9. Применение сварки при ремонте

При ремонте приборов получили распространение следующие виды сварки: дуговая, газовая, сварка трением встык.

45.9.1. Дуговая сварка

Дуговая сварка успешно применяется для восстановления как стальных, так и чугунных деталей. Чаще всего она выполняется путем расплавления электрода и металла свариваемого изделия теплом электрической дуги, температура которой достигает 6000 °С. Таким образом, в месте сварки создается ванночка с жидким металлом, который, охлаждаясь, соединяет воедино края свариваемых поверхностей. При подготовке свариваемых деталей или при подготовке к заварке трещин необходимо выполнить так называемую разделку. Схемы подготовки кромок к сварке приведены на рис. 45.6.

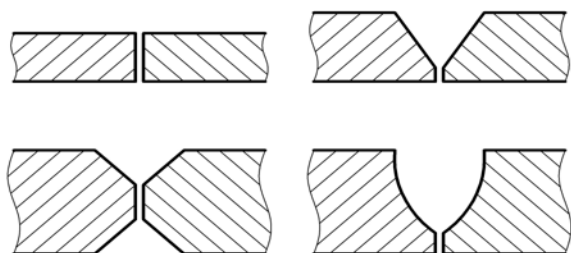


Рис. 45.6. Формы кромок деталей, подготовленных к сварке

Поверхности свариваемых краев должны быть предварительно очищены от грязи, наплывов и коррозии до металлического блеска. Трещину необходимо предварительно «ограничить» сверлением. Образовавшиеся в результате разделки полости при сварке заполняются металлом электрода.

Дуговая сварка обеспечивает прочное соединение, но приводит к деформации свариваемых деталей. В результате сварки деталь испытывает напряжения, которые должны быть сняты. Если можно, свариваемую деталь следует предварительно подогреть, что уменьшает разность температур места сварки и остальной детали и улучшает качество сварки. Если конструкция такова, что сварка вызывает в ней большие внутренние напряжения, деталь следует отжечь путем ее нагрева до 600–650 °С и последующего медленного охлаждения вместе с печью.

Большое распространение получил метод сварки чугунных деталей с помощью вспомогательных элементов – стальных шпилек, ввинчиваемых в края свариваемых деталей. Шпильки ввинчиваются на глубину до 1,5 их диаметра и выступают над кромкой на 4–10 мм. Они предварительно обвариваются (каждая отдельно), затем соединяются между собой сплошной сваркой.

При сварке деталей из алюминия и его сплавов возникают трудности, связанные с тугоплавкостью пленки окислов (Al_2O_3) на поверхности деталей, температура плавления которых 2050 °С. Пленка мешает соединению свариваемых деталей, поскольку температура плавления алюминия 658 °С.

Алюминий и его сплавы сваривают газовой и дуговой сваркой с помощью металлического и графитового электродов или автоматическим способом в инертной среде. При сварке применяют металлические электроды со специальной обмазкой, содержащей фтористые или хлористые соли лития, калия, натрия и кальция, хорошо растворяющие пленку оксидов алюминия.

490

45.9.2. Газовая сварка

Газовая сварка обеспечивает расплавление металла теплом горящего газа в струе чистого кислорода. Газ (ацетилен, природный газ) и кислород подаются в горелку для сжигания через редукторы, снижающие давление газа. В горелке он смешивается с кислородом в горячую смесь, которая сжигается у мундштука. Газовая сварка позволяет использовать почти любой присадочный материал, поэтому она нашла широкое распространение для восстановления деталей, изготовленных из различных материалов. В ремонтной практике газовую сварку чаще используют для восстановления деталей из чугуна.

Газовая сварка приводит к короблению детали, при недостаточно осторожном ведении процесса возможны разрывы, а при наличии трещин – их увеличение. Чтобы избежать разрывов, образования внутренних напряжений и коробления деталей, подлежащих газовой сварке, их следует перед началом процесса подогреть. Общий нагрев обеспечивает лучшее качество сварки.

Для восстановления чугунных деталей, подвергаемых небольшим нагрузкам, в качестве присадочного материала используются латунь и бронза, которые обладают свойствами прочно соединяться с чугунными стенками трещин. Детали, подвергаемые значительным нагрузкам, лучше заваривать чугуном, а в ответственных случаях – с подогревом и последующим отжигом детали. При заварке трещины ее ограничивают сверлением отверстий. После окончания сварки следует закрыть деталь листами асбеста или засыпать песком, чтобы обеспечить ее постепенное и равномерное остывание.

45.9.3. Сварка трением встык

Сварка трением выполняется за счет тепла, выделяемого в процессе трения двух плотно прижимаемых друг к другу деталей, из которых одна вращается, а другая неподвижна.

При восстановлении изношенной детали удаляется та ее часть, которая не может быть использована, а взамен приваривается специально изготовленная новая часть.

Процесс сварки ведется так: одна из свариваемых деталей укрепляется в патроне станка, вторая – в резцедержателе (или приспособлении). Детали центрируются. После закрепления деталей шпиндель приводится во вращение и торцы свариваемых деталей плавно прижимаются друг к другу. В месте стыка температура быстро повышается. По достижении температуры сварки шпиндель станка резко останавливают, и одновременно с этим свариваемые детали сильно прижимают одну к другой. Сварка трением обеспечивает надежное соединение деталей.

45.10. Методы пригонки деталей

Новые детали, устанавливаемые в ремонтируемый прибор, и детали, прошедшие восстановление, собираются в узлы. Сборка отдельных сопря-

жений и узлов требует выполнения пригоночных работ и осуществления необходимых посадок сопрягаемых деталей.

45.10.1. Шабрение

Обработка поверхности, выполняемая путем соскабливания тонкой стружки, называется *шабрением*. Толщина стружки при шабрении колеблется от 0,05 до 0,0005 мм. Шабрение чаще всего применяется как доводочная операция при обработке плоских и внутренних цилиндрических поверхностей.

Шабрение производится при помощи специальных инструментов, называемых *шаберами*. Шаберы изготавливаются из инструментальных сталей У10, У12 и закаливаются до 56–60 HRC. После заточки режущую кромку шабера следует периодически доводить путем притирки на чугунной плите.

Пришабривание чаще всего производится «по краске». Для этого на рабочую поверхность поверочного инструмента или детали, по которой ведется пригонка, наносится тонкий слой разведенной на машинном масле краски. Затем поверочный инструмент или деталь накладывают на подлежащую проверке поверхность и перемещают по ней. В результате перемещения в местах контакта остаются следы краски, отмечающие выступающие участки поверхности, подлежащие снятию шабером. Частота расположения закрашенных пятен определяет степень приближения точности обрабатываемой поверхности к эталонной.

Шабрение ведется при движении шабером «от себя». Если требуется особо точное и чистое шабрение, применяют движение «на себя».

Когда шабрением должна быть обеспечена особо высокая точность поверхности, краска на эталон не наносится, а шабрение ведут по блестящим пятнам (точкам), остающимся на шабруемой поверхности в результате ее контакта с поверочным инструментом или сопряженной деталью (шабрение «на блеск»). Качество шабрения определяется числом закрашенных точек (пятен), приходящихся на квадрат площадью 25 × 25 мм. Припуски на шабрение должны быть минимальными, не более 0,1–0,2 мм.

45.10.2. Притирка

Обработка поверхностей с помощью порошков или паст для получения наиболее полного прилегания данной поверхности к эталонной или к поверхности сопрягаемой детали называется *притиркой*. Притирка применяется для создания плотных или герметичных соединений, а также доводки поверхностей. Припуск на притирку дается в пределах 0,01–0,02 мм.

В качестве притирочных порошков применяются карборунд, корунд, наждак, толченое стекло, окись железа (крокусы), венская известь, окись хрома и т. д. Порошки выбираются в зависимости от твердости материала притираемых деталей. Для притирки стальных деталей применяются ко-

рундовые и наждачные порошки, чугунных и бронзовых деталей – наждачный порошок и толченое стекло.

Кроме порошков для притирки используют пасты. Наибольшее распространение получила химическая паста ГОИ, которая выпускается трех сортов: грубая, средняя и тонкая. Она оказывает на металл химическое воздействие, создает окисную пленку. При перемещении одной трущейся детали по другой, покрытой пастой ГОИ, окисная пленка на выступающих участках поверхности нарушается (как бы срезается с поверхности металла), а взамен ее образуется такая же новая. Этим достигается постепенное сглаживание выступов притираемой поверхности.

Притирка производится двумя способами: притирка деталей одна по другой и притирка деталей по эталонной поверхности. Первый способ при ремонте оборудования применяется чаще.

Материал притира должен быть мягче материала притираемой детали. Притиры-плиты и притиры-брусочки используются для притирки по ним плоскостей небольших размеров. Втулками-притирами пользуются для притирки наружных и внутренних цилиндрических, конических и фасонных поверхностей. Конструкция притира для притирки внутренних поверхностей должна позволять производить его разжим.

В последние годы в качестве притирочных материалов все больше используются алмазные порошки и алмазные пасты.

45.11. Упрочняющая обработка

Для увеличения ресурса восстановленные поверхности деталей подвергают упрочняющей обработке.

45.11.1. Упрочнение методами лазерного воздействия и электроискровой обработки

Лазерная закалка применяется в тех случаях, когда закалка другими методами затруднена из-за сложной конфигурации детали и значительного ее коробления.

Для поверхностного упрочнения лучом лазера характерен ряд особенностей:

возможность локального (по глубине и площади) упрочнения участков поверхностей обрабатываемых деталей в местах их износа;

упрочнение поверхностей труднодоступных полостей углублений, куда луч лазера может быть введен с помощью несложных оптических устройств;

получение определенных физико-механических, химических и других свойств поверхностей при их легировании различными элементами с помощью лазерного излучения;

отсутствие деформаций обрабатываемых деталей, обусловленное локальностью термической обработки, что позволяет полностью исключить финишное шлифование;

простота автоматизации процесса обработки лучом лазера по контуру, в том числе деталей сложной формы, обусловленная бесконтактностью лазерного нагрева.

Лазерную обработку проводят в воздушной атмосфере, но в атмосфере защитного газа аргона, предохраняющего обрабатываемый участок от обезуглероживания.

Критическими режимами лазерного упрочнения являются режимы, при которых воздействие излучения лазера не приводит к нарушению шероховатости поверхности, а глубина упрочненного слоя максимальна. При лазерном воздействии глубина упрочненного слоя z определяется по формуле

$$z = \sqrt{\alpha\tau_{и}},$$

где α – температуропроводность;

τ – длительность импульса лазерного излучения.

Для получения равномерного по глубине упрочненного слоя перед обработкой лазером детали подвергают травлению реактивом следующего состава: хлорное железо – 10 г, соляная кислота – 15 см³, вода – 15 см³. После травления деталь, имеющую ровный темно-серый цвет, устанавливают и фиксируют на столе механизма перемещения лазерной установки.

Схемы управления перемещением лазерного луча в пространстве при упрочняющей обработке приведены на рис. 45.7.

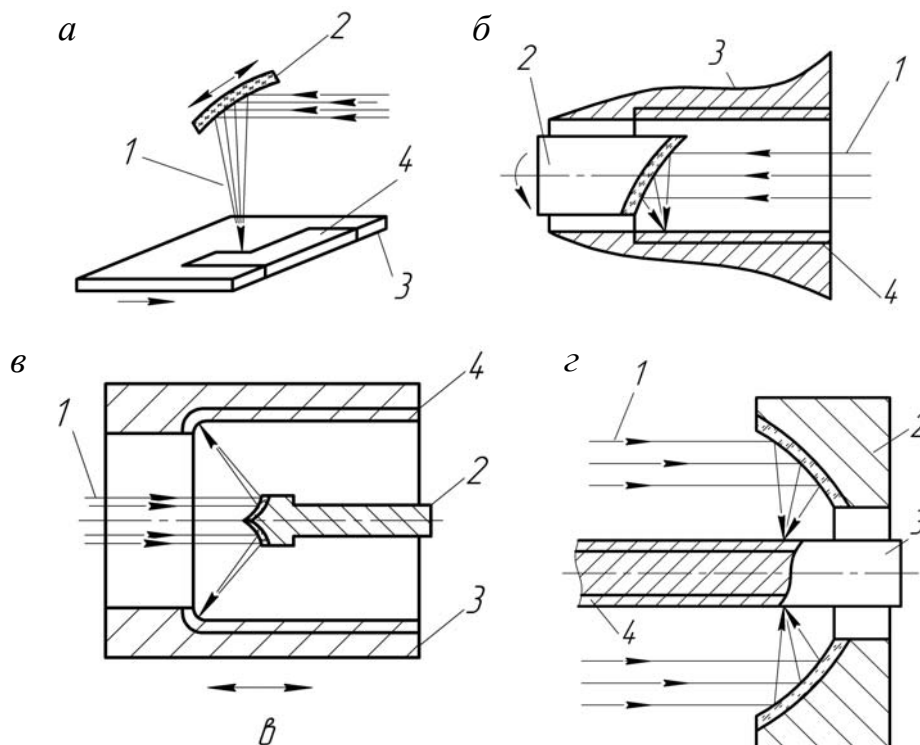


Рис. 45.7. Схемы управления перемещением лазерного луча в пространстве при обработке:

a – плоскости, *б* – отверстия, *в* – внутреннего торца, *г* – наружного цилиндра;
 1 – луч лазера; 2 – фокусирующий элемент; 3 – деталь; 4 – упрочненная зона

45.11.2. Упрочняюще-чистовая обработка деталей приборов

Качество поверхностного слоя оказывает большое влияние на характеристики трения и изнашивания, развитие усталостных явлений, коррозию, КПД приборов, возникновение шумов и на другие параметры и характеристики изделий. Поэтому качество поверхностного слоя является одним из главных факторов, определяющих долговечность деталей механических узлов.

Для улучшения качества поверхностного слоя эффективно применять упрочняюще-чистовую обработку пластическим деформированием. При такой обработке дефекты, образовавшиеся в поверхностном слое детали на предшествующих операциях, в значительной мере ликвидируются, слой упрочняется, в нем создаются сжимающие остаточные макронапряжения, долговечность деталей возрастает.

Основными показателями упрочняюще-чистовой обработки являются толщина и степень наклепа, величина остаточных макронапряжений сжатия и шероховатость поверхности.

Применяют следующие способы упрочняюще-чистовой обработки пластическим деформированием: дробеструйный, обкатывание или раскатывание шарами или роликами, дорнование, центробежно-шариковый (ротационный), чеканка и др. Способы обработки и конструкции инструмента зависят от формы упрочняемой поверхности.

Эффект *дробеструйной* обработки (рис. 45.8) несколько ограничен: пластические деформации проникают на сравнительно малую глубину (до 0,7 мм), шероховатость поверхности практически не уменьшается, микротвердость поверхностного слоя увеличивается незначительно (на 30 %). Этот способ эффективен для фасонных деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок. Сопротивление усталости при этом увеличивается в 1,5 раза и более.

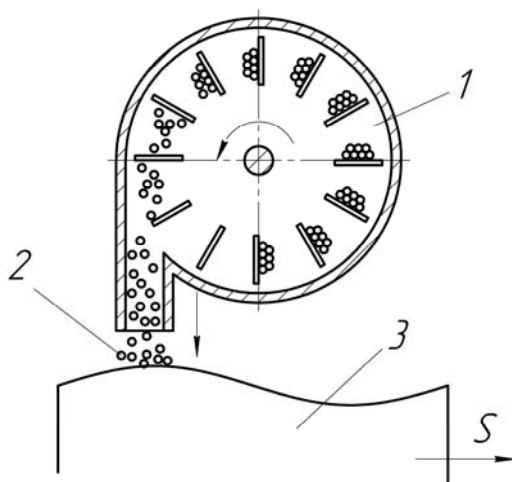


Рис. 45.8. Схема дробеструйной упрочняющей обработки:
1 – механический дробемет; 2 – дробь; 3 – обрабатываемая деталь

Обкатывание шаром или роликом наиболее распространено, так как имеет большие возможности: снижается шероховатость поверхности от $Rz = 40$ до $Ra = 0,16$ мкм, микротвердость поверхностного слоя увеличивается на 40–60 %, получается наклеп значительной толщины.

Дорнование (рис. 45.9) – процесс, при котором создается наклеп незначительной толщины (до 1 мм). Микротвердость поверхностного слоя при этом способе обработки возрастает на 25–30 %, шероховатость снижается от $Rz = 40$ до $Ra = 0,08$ мкм.

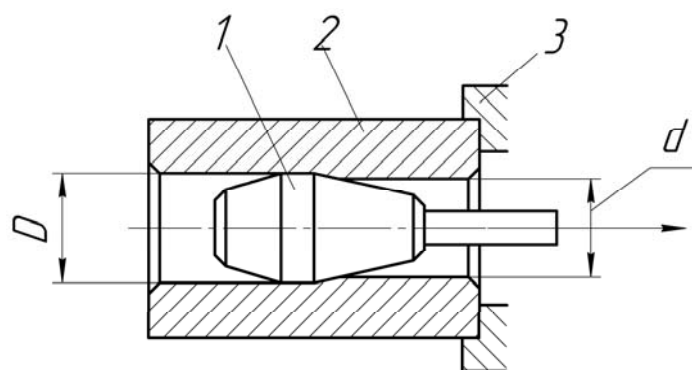


Рис. 45.9. Схема обработки дорнованием:

1 – дорн; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – упорная плита станка

Чеканка осуществляется путем ударного воздействия бойка, которому сообщают возвратно-поступательное движение с высокой частотой (закрепленного, например, в устройстве типа отбойный молоток). Глубина наклепа достигает 20–25 мм, сопротивление усталости повышается на 50–100 %, долговечность деталей увеличивается в два раза и более.

Алмазное выглаживание применяют при финишной обработке деталей. Отделка и упрочнение деталей этим методом приводят к повышению производительности труда по сравнению с доводкой чугунами притирами; достигаемая шероховатость поверхности – от $Ra = 0,04$ до $Rz = 0,1$ мкм, что в сочетании с упрочнением и остаточными макронапряжениями сжатия значительно повышает износостойкость детали.

При упрочнении *ультразвуковым методом* инструмент под действием сил: статической и значительно больше – динамической, создаваемых колебательной системой (ультразвуковым генератором, магнитострикционным преобразователем и концентратором), пластически деформирует поверхностный слой детали, предварительно обработанной резанием, и тем самым упрочняет его, одновременно сглаживая неровности поверхности. Статическая сила создается действием груза, перемещающегося по направляющим, или другим способом.

45.12. Ремонт резьбовых и шпоночных соединений

Резьбовые соединения, подвергшиеся коррозии, для облегчения разборки предварительно подвергают следующим видам обработки:

отмачиванию в керосине в течение 30–60 мин (крупные узлы обертывают ветошью, смоченной в керосине);

отбиванию гайки слесарным молотком (с использованием массивной поддержки);

прогреванию паяльной лампой или газовой горелкой до температуры не выше 450 °С.

Шпильки вывинчивают и завинчивают гаечными ключами с помощью двух законтренных гаек (для вывинчивания ключом берут за нижнюю гайку). Для вывинчивания сломанных шпилек на их стержне запиливают лыски, прорезают шлиц или к стержню приваривают стальной пруток. Шпильки, не поддающиеся вывинчиванию, высверливают.

Затягивание гаек болтов и шпилек при сборке деталей и узлов во избежание деформации или перекоса сопрягаемых поверхностей выполняют в определенной последовательности. Сначала все гайки затягивают примерно на 1/3 полного усилия, затем – на 2/3 и наконец – полностью.

Напряжение в стержне болта (шпильки) при затягивании гаек не должно превышать 0,4–0,5 предела текучести материала, поэтому для ручных гаечных ключей при усилии в 300 Н длина рычага принимается равной 12–15 значениям диаметра резьбы. Нельзя наращивать рукоятки ключей для их усиления или закладывать прокладки в зеве ключей для уменьшения их размеров. При сборке ответственных соединений применяют ключи с мультипликатором (тарированные ключи), не допускающие превышения нормативного усилия.

Недостаточную полноту, забитость, увеличение шага или срывы ниток наружных и внутренних резьб определяют их внешним осмотром и измерением резьбомером или предельными калибрами (Пр и Нс). Крепежные детали с изношенными и вытянутыми резьбами, а также с разрушенными более чем на 0,5 витка нитками резьбы, входящими в гайку, бракуют. Бывшие в употреблении шплинты и упругие шайбы повторно не используют.

Дефектные резьбы в корпусных и других деталях приборов рассверливают и в отверстиях нарезают стандартную резьбу большего диаметра. По размеру новой резьбы изготавливают ступенчатую шпильку или в деталь устанавливают переходный резьбовой штуцер. Допускается углублять резьбовое отверстие и устанавливать удлиненную шпильку.

Болты и шпильки с уменьшенным диаметром стержня вследствие вытягивания или коррозии бракуют. Износ граней гаек и шляпок болтов определяют измерением диаметра окружности, в которую вписывается многогранник; уменьшение этой окружности допускается на 6–8 %. Износ шлицев винтов по ширине допускается в пределах 1,5 их номинального размера.

Изношенные шпоночные пазы обрабатывают слесарным инструментом или фрезой на станке до восстановления правильной формы. Ширину пазов допускается увеличивать на 15 % по сравнению с номинальным их размером, указанным в чертеже; при этом изготавливается новая шпонка соответствующих размеров, имеющая прежнюю форму, или ступенчатая (ес-

ли паз сопрягаемой детали не подвергался обработке). При нецелесообразности восстановления изношенного паза можно фрезеровать (если это допускает конструкция детали) новый паз, расположенный под углом от 90 до 180° относительно прежнего.

Наплавка кромок или заплавление изношенных пазов валов допускается при условии последующего высокотемпературного отпуска вала и проверки его прямолинейности.

45.13. Ремонт валов

45.13.1. Дефектация

Перед дефектацией валы освобождают от всех деталей, промывают и сушат.

Снижение чистоты сопрягаемых поверхностей является результатом различных видов износа или действия агрессивных сред и определяется визуально путем сопоставления чистоты дефектуемых поверхностей с эталонами чистоты.

Все дефекты чистоты поверхностей устраняют шлифованием и полированием шеек на станках или вручную с применением специальных приспособлений. Мелкие дефекты (забоины) диаметром до 5 мм зачищают бархатным напильником и абразивным полотном.

Усталостные трещины и изломы возникают в результате длительного действия циклических нагрузок при перегрузках механизмов. Трещины появляются главным образом в местах концентрации напряжений – в галтелях, шпоночных пазах, у смазочных отверстий и лысок. Наличие трещин обнаруживают внешним осмотром и дефектоскопией. При капитальном ремонте все ответственные валы проверяют магнитной или другой дефектоскопией.

Уменьшение размеров и дефекты геометрической формы шеек, сопрягаемых с подшипниками скольжения, могут явиться результатом как нормального, так и аварийного износа. Для большинства валов характерен неравномерный износ шеек с образованием овальности, конусности, седловидности, бочкообразности.

Неправильность формы шеек определяется микрометром, индикаторной скобой или штангенциркулем. Для определения конусности и овальности измерения выполняют не менее чем в двух взаимно перпендикулярных плоскостях на расстоянии 10–15 мм от торца вала.

Неправильность формы шеек устраняют в зависимости от характера дефекта шлифованием или протачиванием и шлифованием с последующим полированием поверхности. Предельное уменьшение диаметра шеек вследствие износа и обработки не должно превышать 6 % их номинального размера.

Износ шеек в неподвижных сопряжениях (под кольцами подшипников качения, ступицами шкивов, зубчатых колес) возникает вследствие пластической деформации металла на контактных поверхностях при недостаточной их чистоте или неправильности формы.

45.13.2. Технология ремонта

Правку валов выполняют в холодном состоянии с помощью винтовых или гидравлических прессов, а также домкратов.

Вал выставляют на столе пресса по индикатору выпуклой стороной против силовой головки и один конец вала, чтобы исключить его случайное смещение, закрепляют хомутом или другим способом. При использовании домкратов вал закрепляют в специальной раме, сваренной из профильной стали. Вал должен опираться на подставки или прокладки из мягкого металла, профиль поверхности которых соответствует профилю опорных поверхностей вала. На головке пресса закрепляют аналогичный пуансон. Правку выполняют, прилагая постепенно возрастающие усилия при постоянном контроле степени деформации индикатором.

Шлифование и полирование шеек вручную выполняют для получения необходимой чистоты поверхности; правильность формы шеек при этом не восстанавливается. Операции выполняют абразивным полотном с помощью отрезка плоского приводного ремня или жимков. Ж и м к а м и называют раскрывающиеся деревянные или металлические колодки с вырезом, охватывающим шейку вала. Вырез оклеивается фетром, на который наносят шлифовальную или полировальную пасту. В жимках иногда укрепляют чугунные вкладыши, внутренний диаметр которых соответствует диаметру обрабатываемой шейки. Вкладыши способствуют исправлению формы, но не обеспечивают необходимой ее точности. Шлифование и полирование выполняют, перемещая жимки за рукоятки в пределах трети окружности.

В качестве шлифовальных материалов используют полотно с абразивом электрокорунда белого зернистостью 80–16; для полирования – такое же полотно зернистостью 6–4 или пасты. Для достижения $Ra\ 0,32$ применяют пасты ГОИ, шлифующим материалом которых является окись железа или окись хрома.

Шлифование на станках обеспечивает необходимую правильность геометрической формы шеек. Обработку выполняют на круглошлифовальных станках с продольным и поперечным перемещением круга или на токарных станках, оснащенных шлифовальным приспособлением.

45.14. Ремонт подшипников

45.14.1. Подшипники скольжения

А. Конструктивные особенности, технические требования

Подшипники скольжения подразделяются на *цельные* (глухие), выполненные в виде втулок, и *разъемные*, состоящие из двух или нескольких частей.

Основными антифрикционными материалами для изготовления подшипников являются баббиты, бронзы и чугуны. Баббиты обладают хорошими антифрикционными свойствами при больших скоростях движения, но чувствительны к ударным нагрузкам и высоким температурам (свыше 100 °С).

Бронзы хорошо противостоят высоким удельным и ударным нагрузкам, допускают большие скорости движения, малочувствительны к загрязненной смазке, но дороги.

Слабонагруженные подшипники, работающие при относительно больших скоростях движения, изготавливают из антифрикционных (СЧЦ1, СЧЦ2) или других специальных чугунов, а работающие при малых скоростях движения – из ковкового или серого чугуна СЧ 18 – СЧ 36.

Б. Дефектация

Основным показателем степени износа подшипников является увеличение диаметрального зазора между поверхностями трения.

Износ цилиндрических поверхностей скольжения определяется по увеличению диаметрального зазора между шейкой вала и подшипником. У цельных подшипников зазор вычисляют как разность размеров диаметров отверстия подшипника и шейки вала в наиболее изношенном месте. У разъемных подшипников для измерения зазора между шейкой и верхним вкладышем поперек шейки на расстоянии 10–15 мм от галтелей закладывают два отрезка свинцовой проволоки диаметром 0,5–1 мм. Завинчивая гайки болтов крепления вкладыша, сдавливают проволоку, и по толщине оттиска определяют зазор. Также можно измерить зазор по толщине латунных пластинок, закладываемых между поверхностями скольжения. Пластинка, соответствующая действительному размеру зазора, создает ощутимое торможение при поворачивании вала.

Допустимый размер зазоров в дефектовочных картах устанавливают отдельно для каждого подшипникового узла и вида ремонта на основании расчетов и эксплуатационных испытаний оборудования.

Плотность прилегания вкладышей к гнезду базовой детали проверяют с помощью краски, которую наносят на наружную поверхность вкладышей и плоскости их разъема. Положение вкладыша считают правильным, если пятна краски равномерно распределяются на сопрягаемых поверхностях и занимают 75 % их площади.

В. Ремонт подшипниковых узлов

Замену неразъемных подшипников – втулок (бронзовых, чугунных, залитых баббитом) производят с учетом способа их закрепления в корпусе. Бронзовые втулки при запрессовке в корпус сжимаются, а их внутренний диаметр уменьшается примерно на 40–60 % посадочного натяга. В связи с этим чистовое растачивание или развертывание втулок производят после их запрессовки.

Втулки, сопрягаемые с корпусом переходными посадками, практически не изменяют внутреннего размера, поэтому после установки на место их внутреннюю поверхность обрабатывать под размер необязательно.

Припуск на шабрение поверхностей скольжения бронзовых и чугунных втулок диаметром 80–100 мм составляет 0,03–0,05 мм, баббитовых – 0,1–0,15 мм.

Ремонт разъемных баббитовых и бронзовых подшипников выполняют в следующем порядке:

1) подшипниковый узел разбирают и рабочие поверхности шейки и антифрикционного слоя тщательно очищают от загрязнений и местных повреждений – задиров, наплывов металла и др.;

2) проверяют соответствие шейки техническим требованиям и при необходимости обрабатывают ее для достижения нужного размера, правильности формы и чистоты поверхности;

3) с помощью краски или щупа (пластина щупа толщиной 0,03 мм не должна проходить между сопрягаемыми поверхностями) проверяют плотность прилегания наружной поверхности вкладыша к посадочному гнезду корпуса;

4) на поверхность шейки наносят краску (синьку или сажу, разведенную на машинном масле) и растирают ее пальцами до получения тонкого равномерного слоя;

5) с двух стыковых плоскостей подшипника удаляют равное количество прокладок общей толщиной по 0,05–0,08 мм;

6) собирают узел, болты крепления подшипника затягивают до предела и поворачивают вал или подшипниковый узел на два–три оборота;

7) узел разбирают, вкладыши закрепляют в тисках, а окрашенные участки поверхности скольжения шабруют;

8) восстанавливают окраску на шейке, вновь собирают узел и, определив места соприкосновения, продолжают шабрение.

Операцию повторяют несколько раз и считают законченной, когда пятна краски будут расположены в средней части вкладыша и займут не менее $\frac{2}{3}$ его рабочей поверхности. Необходимость многократного повторения шабровки вызвана тем, что при удалении прокладок со стыковых поверхностей отверстие подшипника теряет форму правильной окружности, которую нужно восстанавливать.

Качество шабровки, определяемое с помощью шаблона, характеризуется количеством пятен касания размером около 3 мм, приходящихся на квадрат со стороной 25 мм (такой размер квадрата принят для измерительной сетки). При чистом шабрении должно быть 16–18 пятен, при грубом 8–10.

По окончании шабровки подшипник должен туго поворачиваться на валу. Для обеспечения смазочного зазора между вкладышами закладывают прокладки необходимой толщины.

45.14.2. Подшипники качения

Возможность повторного использования шарикоподшипников качения в механизмах, отработавших межремонтный ресурс, устанавливается на основании анализа условий работы механизма и шарикоподшипника, опыта эксплуатации, статистических данных о фактическом состоянии отработавших шарикоподшипников, лабораторных исследований их и подтверждается стендовыми испытаниями шарикоподшипников в составе механизмов.

Дефектацию шарикоподшипников проводят путем визуального осмотра и с помощью оптических средств, а также проверки качества вращения. В исключительных случаях измеряют внутренний зазор подшипника (радиальный или осевой) и делают рентгеновское просвечивание. Внутренние зазоры в подшипниках должны соответствовать значениям, приводимым в технических условиях на новые шарикоподшипники.

Перед дефектацией шарикоподшипники очищают.

Осмотр шарикоподшипников производят при высокой освещенности, создаваемой рассеянным светом. При осмотре используют лупу 7–10-кратного увеличения. Подшипники следует брать с помощью салфеток, хлопчатобумажных перчаток, напальчников. Осматривают все поверхности деталей, особое внимание обращая на беговые дорожки.

В шарикоподшипниках могут встречаться следующие дефекты:

цвета побежалости, представляющие собой окисные пленки, образующиеся при нагреве подшипника до температуры, превышающей 200 °С;

трещины на кольцах, шариках, сепараторе (для уточнения характера дефекта используется бинокулярный микроскоп 32-кратного увеличения);

выкрашивание частиц металла;

продольные риски на посадочных поверхностях колец;

наклеп и контактная коррозия на посадочной поверхности кольца, чаще внутреннего, вследствие неплотной посадки кольца;

бликовые отпечатки, лунки на беговых дорожках, характерные для подшипников, работающих при повышенных вибрациях;

коррозия деталей подшипника.

Шарикоподшипники с цветами побежалости, трещинами, усталостным выкрашиванием металла, лунками на беговых дорожках подлежат отбраковке и утилизации: подшипники со следами коррозии, продольными рисками после восстановления могут использоваться для сборки отремонтированных механизмов.

Проверка качества вращения является обязательным этапом дефектации шарикоподшипников. Повреждения, появляющиеся во время эксплуатации, нарушают легкость вращения колец, присущую новым шарикоподшипникам. Проверка качества вращения служит основным методом оценки работоспособности закрытых подшипников. При проверке качества вращения шарикоподшипник удерживают в горизонтальном положении за внутреннее кольцо. Наружное кольцо медленно поворачивают на три–четыре оборота в каждую сторону. Затем подшипник поворачивают на 180° и повторяют проверку. Подшипник должен иметь легкое ровное вращение: заедания, хруст, затираания не допускаются. Далее наружное кольцо приводят в быстрое вращение, которое должно сопровождаться тихим ровным шумом. Частота вращения по инерции должна плавно снижаться до нуля. Быстрое торможение кольца свидетельствует о намагниченности деталей подшипника. Намагниченность подшипника можно проверить тонкой

отожженной стальной проволокой. Намагниченные подшипники следует размагнитить индуктором.

Качество вращения подшипника сравнивают с вращением нового или эталонного. Подшипники с неудовлетворительным качеством вращения отбраковывают и утилизируют.

Ремонт шарикоподшипников заключается в удалении мелких механических повреждений и следов коррозии. Следы наклепа, трения, заусенцы с краев рисок зачищают микрошкуркой, смоченной керосином или маслом, с последующей промывкой подшипников в бензине Б-70.

Коррозионные повреждения удаляют механическим или химическим способом.

Механическое удаление следов коррозии производят зачисткой фетром, смоченным в керосине, с добавлением тонких абразивных паст, абразивным бруском, микрошкуркой.

Перед химическим удалением коррозии подшипники промывают и обезжиривают. Чистые подшипники на 20–40 мин погружают в раствор следующего состава:

хромовый ангидрид	140 г;
ортофосфорная кислота плотностью 1,7	80 г;
вода	1000 мл.

Температура раствора должна поддерживаться в пределах 85–95 °С. В процессе травления растворяются продукты коррозии, а сталь не взаимодействует с раствором.

После удаления коррозии подшипники промывают в горячей и холодной воде, а затем выдерживают при температуре 18–22 °С в течение 15–20 мин в растворе следующего состава:

триэталонамин	4–5 г;
нитрид натрия	1–2 г;
вода	500 мл.

Подшипники просушивают и вновь направляют на дефектацию для окончательного контроля.

Удалению подлежат лишь мелкие повреждения и коррозия на поверхностях деталей шарикоподшипников, исключая беговые дорожки и шарики. При наличии дефектов в указанных местах шарикоподшипники отбраковывают.

Хранить подшипники до сборки, если время до их установки превышает 2 ч, следует в эксикаторе.

Литература к разделу 5

1. Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники / под ред. В. А. Кузнецова. – М. : Радио и связь, 1990. – 238 с.
2. Основы эксплуатации средств измерений / под ред. Р. П. Покровского. – М. : Радио и связь. 1984. – 183 с.

3. Асс, Б. А. Сборка, регулировка и испытание авиационных приборов / Б. А. Асс, З. Ф. Уразаев, Б. Я. Мясников. – М. : Машиностроение, 1969. – 311 с.
4. Балабанов, А. Н. Справочник технолога мелкосерийных и ремонтных производств / А. Н. Балабанов, В. Е. Канарчук. – Киев : Вища школа, 1983. – 256 с.
5. Волковик, Е. А. Справочник по восстановлению деталей / Е. А. Волковик. – М. : Колос, 1981. – 351 с.
6. Зерний, Ю. В. Сборка и регулировка приборов точной механики : учебное пособие / Ю. В. Зерний. – М. : Всесоюзный заочный машиностроительный институт, 1984. – 88 с.
7. Коробов, А. И. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / А. И. Коробов. – М. : Радио и связь, 1987. – 271 с.
8. Молодык, Н. В. Восстановление деталей машин : справочник / Н. В. Молодык, А. С. Зенкин. – М. : Машиностроение, 1989. – 480 с.
9. Молодык, Н. В. Восстановление деталей машин / Н. В. Молодык, Б. А. Лангрет, А. К. Бредун. – Киев : Урожай, 1985. – 160 с.
10. Муханов, И. И. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом / И. И. Муханов. – М. : Машиностроение, 1987. – 44 с.
11. Недельский, Г. В. Монтаж и ремонт торгово-технологического оборудования / Г. В. Недельский. – М. : Экономика, 1981. – 311 с.
12. Основы ремонта машин / под ред. Ю. Н. Петрова. – М. : Колос, 1972. – 527 с.
13. Полевой, С. Н. Упрочнение металлов : справочник / С. Н. Полевой, В. Д. Евдокимов. – М. : Машиностроение, 1986. – 320 с.
14. Поляков, К. П. Конструирование приборов и устройств радиоэлектронной аппаратуры / К. П. Поляков. – М. : Радио и связь, 1982. – 239 с.
15. Проников, А. С. Надежность машин / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 580 с.
16. Ремонт машин / под общ. ред. И. Е. Ульмана. – М. : Колос, 1976. – 448 с.
17. Повышение качества восстановления деталей машин / П. А. Руденко [и др.] ; под общ. ред. Н. В. Молодыка. – Киев : Урожай, 1978. – 176 с.
18. Технологические рекомендации по применению методов восстановления деталей машин. – М. : ГОСНИТИ, 1976. – 126 с.
19. Черницкий, И. И. Авиационные электромеханизмы малой мощности / И. И. Черницкий, И. Л. Потупиков. – М. : Машиностроение, 1986. – 264 с.
20. Шейнгольд, Е. М. Технология ремонта и монтажа промышленного оборудования / Е. М. Шейнгольд, Л. Н. Нечаев. – Л. : Машиностроение, 1973. – 399 с.