

Министерство образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики

Кафедра компьютеризации и проектирования  
оптических приборов

**А.М. Бурбаев**

**ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ  
КОНСТРУКЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

**Учебное пособие**



Санкт-Петербург  
2004

УДК 658.12.4:681.7

Бурбаев А.М. Отработка технологичности конструкций оптических приборов. Учебное пособие.- СПб: СПбГУИТМО, 2004 – 95с.

Вводится понятие технологичности конструкций. Поясняются основные принципы анализа технологичности конструкции. Рассматриваются критерии её оценки и пути её повышения для случая оптических приборов. Приводятся примеры анализа и отработки технологичности конструкций.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оплотехники в качестве учебного издания для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 1907000 – Опτικο-электронные приборы и системы направления подготовки дипломированных специалистов 654000 – Оплотехника.

Рецензенты: д.т.н., проф. В.К. Кирилловский, СПбГУИТМО;  
к.т.н., доц., вед. констр. ОАО «ЛОМО» Р.М. Рагузин.

© Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики,  
2004

© А.М. Бурбаев, 2004

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

#### НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

|   |    |
|---|----|
| Основные аббревиатуры.....  | 4  |
| Введение.....   | 4  |
| Понятие технологичности конструкций.....                                      | 7  |
| Основные принципы анализа технологичности конструкций.....                    | 10 |
| Критерии оценки технологичности конструкций оптических приборов...            | 14 |
| Пути обеспечения высокой технологичности конструкций оптических приборов..... | 20 |

### ЧАСТЬ ВТОРАЯ

#### ПРИМЕРЫ АНАЛИЗА И ОТРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

|  |    |
|--|----|
| Разработка новых схем и оригинальные конструкторские решения.....  | 32 |
| Расчленение конструкции изделия на составные части, обеспечение удобства сборки.....                     | 42 |
| Применение анализа размерных цепей и компенсаторов независимого действия.....                            | 51 |
| Применение структурного анализа конструкций неподвижных соединений, кинематических пар и механизмов..... | 59 |
| Анализ и отработка конструкций устройств регулировки оптических элементов.....                           | 70 |
| Применение результативной обработки.....   | 86 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | .9 |
|------------------------|----|

## **ЧАСТЬ ПЕРВАЯ**

### **НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

#### **ОСНОВНЫЕ АББРЕВИАТУРЫ**

ТК – технологичность конструкции,  
ТЗ – техническое задание,  
ТУ – технические условия,  
ОП – оптический прибор,  
СЕ – сборочная единица,  
КБ – конструкторская база,  
ЗПС – зеркально-призмная система,  
УСКЮ – универсально-сборные, контрольно-юстировочные  
приспособления,  
БМИ – большой микроскоп инструментальный,  
УИМ – универсальный измерительный микроскоп,  
ДИП – двухкоординатный измерительный прибор.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В процессе разработки современного оптического прибора неизбежно встаёт вопрос о возможности его изготовления в условиях серийного производства. Конструкция прибора, требующая для изготовления меньших затрат труда, более технологична. По установленной терминологии [1] под «технологичностью конструкции изделия» понимается совокупность свойств конструкции изделия, определяющих её приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества, объёма выпуска и условий выполнения работ. Чем лучше отработана конструкция изделия на технологичность, тем меньше затрат труда всех видов требуется для производства, эксплуатации и ремонта этого изделия. Отработка конструкций изделий на технологичность, являясь одной из функций

технологической подготовки производства, входит в общее понятие подготовки производства.

Со времени возникновения понятия «технологичность конструкции» в течение длительного времени в теории и практике отработки конструкций изделий на технологичность основную роль играла качественная оценка принимаемых конструктивных решений. Осуществлялась она на основе разработанных рекомендаций и технологических требований к тем или иным конструктивным решениям, например, [2]. Такие требования, как правило, иллюстрировались примерами с рекомендациями по типу «лучше – хуже», «рекомендовать – не рекомендовать», «технологично – не технологично». Выработанные теорией и практикой, такие рекомендации приносили и приносят большую пользу, являясь хорошим справочным пособием для конструктора в процессе проектирования.

При выборе наиболее экономичного решения из ряда возможных, технически равнозначных не ставится вопрос, насколько в количественном отношении отличаются варианты друг от друга, важно отобрать тот вариант, который является более простым в изготовлении, требует для своего изготовления меньших затрат всех ресурсов, то есть более технологичный. Решение этой задачи должно проводиться с применением качественных критериев путём оценки соответствия выбранных вариантов конструктивных решений технологическим требованиям прогрессивных процессов изготовления и сборки.

При таком анализе, естественно, важное значение имеют практический опыт конструктора, его знание возможных методов обработки и сборки, требований, накладываемых на конструкцию процессами изготовления. Но личный опыт работников конструкторских подразделений различен, и полагаться только на него – значит игнорировать передовой опыт, отрицать коллективный опыт, идти по чисто субъективному пути. Специализация инженерных служб неизбежно приводит к тому, что даже технологи, разрабатывающие технологические процессы, не могут быть компетентными во всех видах. Отсюда можно сделать вывод, что технологические требования, предъявляемые к тем или иным процессам изготовления, должны формулироваться специалистами-технологами по этим процессам и фиксироваться в соответствующей нормативно-технической и справочной документации, отражающей передовой научно-технический опыт.

Имеется достаточно литературы, посвящённой как проблемам, так и научно-техническим и методическим основам обеспечения ТК изделий машиностроения, например, [3–11]. Многие из приведённых здесь

критериев оценки и правил обеспечения ТК машин универсальны и применимы к оптическому приборостроению. Вместе с тем ОП имеют принципиальные отличия от машин. Если для машин, главным назначением которых является преобразование энергии, основными показателями качества являются коэффициент полезного действия и износоустойчивость, то для приборов, предназначенных для передачи и преобразования информации, главными показателями качества являются чувствительность (порог чувствительности) и воспроизводимость информации (уровень отношения сигнал-шум), а также точность. Более того, производство ОП характеризуется специфическими особенностями, касающимися, прежде всего, изготовления оптических деталей, а также финишного этапа производства – сборки, юстировки и контроля. Всё это обусловило разный подход конструкторов и технологов к решению задач проектирования при разработке машин и приборов.

В хорошо известной специалистам и студентам-оптикам справочной и учебной литературе, посвящённой проектированию, конструированию и технологии ОП, вопросам обеспечения ТК уделено определённое внимание. Так в учебнике [12] перечислены технологические требования, которые следует учитывать при проектировании современных ОП. Подробно обосновывается выбор системы допусков на изготовление деталей. В справочнике [13] вводится понятие точностной технологичности. В зависимости от достижимой точности, оборудования, оснащения и методов выполнения технологические процессы операций обработки деталей и сборки, применяемые в точном приборостроении, распределяются по трём уровням точности: экономическому, производственному и техническому, которые и приняты в качестве критериев точностной ТК. В учебном пособии [14] изложение принципов конструирования дано с позиций обеспечения точности приборов, а также их технологичности и, в частности, в отношении сборки и юстировки. Путям повышения производительности труда на сборке ОП посвящён отдельный раздел в монографии [15]. Здесь же перечислены свойства, которыми должна отличаться конструкция ОП, технологичная в сборке.

Вместе с тем студенты старших курсов, ещё не успевшие приобрести достаточного опыта проектной работы, преодолевающие в процессе выполнения домашних заданий, курсовых и дипломных проектов многочисленные трудности и допускающие типичные ошибки, нуждаются в соответствующих методиках и рекомендациях. Эти методики и рекомендации позволили бы студентам не только оценить уровень технологичности исходного варианта конструкции и избежать

принципиальных ошибок, но и улучшить конструктивные решения. Сбор и изложение в систематизированном виде многочисленных и одновременно разрозненных рекомендаций по отработке ТК и совершенствованию технологии сборки и юстировки ОП, приведённых в различных литературных источниках, а также полученных автором в результате собственного опыта работы на ЛОМО и многолетнего сотрудничества со специалистами объединения - с целью оказать помощь студентам в повышении уровня их конструкторской и технологической подготовки и явилось целью написания настоящего учебного пособия.

В первой части учебного пособия формулируются критерии оценки и пути обеспечения технологичности конструкций оптических приборов. Во второй части пособия приводятся и анализируются конкретные примеры отработки технологичности конструкций оптических узлов и приборов.

Пособие предназначено для студентов оптических специальностей вузов, а также может быть полезным специалистам-практикам, занимающимся проектированием оптических приборов и разработкой методик их юстировки.

## **ПОНЯТИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ**

Прежде чем приступить к проектированию изделия, необходимо досконально изучить задачи, для решения которых создаётся это изделие, и чётко определить его функциональное назначение. Чтобы точно сформулировать функциональное назначение изделия, надо хорошо знать сам процесс, который предстоит выполнять создаваемому изделию. Именно с этого следует начинать подготовку производства нового изделия.

Ясное представление о функциональном назначении изделия является основой для разработки ТЗ на изделие. ТЗ разрабатывают на основе результатов научно-исследовательских и экспериментальных работ, анализа передовых достижений науки и техники – как отечественной, так и зарубежной. В ТЗ включают показатели технического уровня и качества изделия, в том числе и базовые показатели технологичности. Показатели, включаемые в ТЗ, условно делятся на две категории:

- технические показатели – устанавливают степень пригодности изделия к использованию;
- экономические показатели – устанавливают требования к уровню затрат труда и средств достижения показателей первой категории.

Показатели второй категории, включающие в основном показатели технологичности, характеризуют свойства конструкции, имеющие большое значение для экономики. Недооценка влияния этих показателей на качество изделия в целом приводит к неоправданно большим затратам средств и труда на производство и эксплуатацию изделий. Согласно ГОСТ 14.205-83 под технологичностью следует понимать совокупность свойств конструкции изделия, определяющих её приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, техническом обслуживании и ремонте для заданных показателей качества, объёма выпуска и условий выполнения работ.

Сопоставление этой и прежней (ГОСТ 18831-73) трактовки понятия ТК выявляет прежде всего отказ от сравнения разрабатываемого варианта по соответствующим показателям с однотипной конструкцией (аналогом), что не только облегчает оценку уровня ТК, но и открывает широкий простор для создания нормативных уровней, адекватно отражающих требования научно-технического прогресса.

Каждая конструкция несёт в себе информацию о технологии её изготовления в конкретных производственных условиях. То, что в одних определённых условиях, характеризуемых, например, специализацией цехов, наличием того или иного оборудования и средств технологического оснащения, освоением специальной технологии, квалификацией исполнителей, может быть рациональным, технологичным, в других может оказаться неприемлемым. К производственным условиям следует отнести также программу выпуска, в зависимости от которой и разрабатывается технологический процесс изготовления изделия. Конструкция, технологичная в условиях единичного или мелкосерийного производства, оказывается нетехнологичной в условиях массового производства, и наоборот. Кроме того, постоянное внедрение в производство достижений научно-технического прогресса, освоение новых методов изготовления изделий расширяет технологические возможности и ещё более увеличивает степень относительности самого понятия ТК как комплекса свойств.

Конструктор, проектируя изделие и стремясь в максимальной степени обеспечить технологичность его деталей, СЕ и изделия в целом, должен отдавать себе отчёт в том, что технологичная заготовка ещё не обеспечивает технологичности изготавливаемой из неё детали, а технологичные детали не гарантируют технологичности СЕ. С другой стороны, стремление уменьшить трудоёмкость сборки может привести к резкому возрастанию затрат на механическую обработку деталей, а излишнее стремление к снижению общей трудоёмкости изготовления



изделия может привести к повышению расходов на техническое обслуживание и ремонт, которые перекроют полученную ранее экономию по заработной плате, - в целом это экономически не выгодно. Только комплексная оценка ТК как свойства, проявляющегося в сферах производства и эксплуатации (с учётом совокупных затрат труда и средств), является наиболее эффективным и объективным средством, позволяющим принять решение по выбору варианта конструкции изделия с целью повышения его качества.

Обеспечение ТК является частью работы по созданию конструкции, органически связанной со всеми этапами конструкторской подготовки производства. Наибольшее значение имеют конструктивные решения на первых стадиях проектирования, когда определяются основные конструктивно-технологические признаки конструкции, предопределяющие в основном её технологичность. На стадии эскизного проектирования, например, отработка конструкции изделия на технологичность выражается в технологическом контроле конструкторской документации и должна включать решение следующих задач:

- окончательный выбор варианта рациональной конструктивной схемы изделия, в которой определены основные составные части, компоновка изделия, членение, методы соединения и общие габаритные размеры;
- выявление составных частей, которые могут быть стандартными или унифицированными, либо же могут быть заимствованы из освоенных в производстве образцов;
- выявление условий общей сборки изделия и возможности параллельныхборок его составных частей;
- выявление возможности использования КБ как технологических;
- выявление номенклатуры используемых конструкционных материалов и возможности её сокращения;
- выявление условий технического обслуживания и ремонта изделия и возможности сокращения затрат на их проведение;
- выявление новых технологических процессов, требующих новых средств технологического оснащения;
- принципиальная оценка технологичности основных составных частей конструкции.

Для успешного решения всех этих задач необходимо ориентироваться на конкретные производственные условия предприятия-изготовителя разрабатываемого изделия, которое определено в ТЗ. В технически обоснованных случаях в целях повышения качества изделия и производительности труда следует настаивать на изменении предприятия-

изготовителя (в условиях единичного и мелкосерийного производства) или на необходимости технического перевооружения указанного предприятия (в условиях крупносерийного и массового производства).

Как уже отмечалось, вопросам отработки и оценки ТК изделий машиностроения и приборостроения посвящено немало литературы. Вместе с тем, применительно к оптическому приборостроению, а более точно – к производству оптических деталей, а также к финишному этапу производства – эти вопросы, по мнению автора, освещены и исследованы недостаточно полно. Учитывая, что вопросы ТК оптических деталей рассмотрены в справочнике [16], в дальнейшем при формулировании критериев оценки ТК ОП, а также путей её обеспечения акцент будет сделан в сторону сборки, юстировки и контроля, удельный вес которых в общей трудоёмкости изготовления изделий составляет 40-60% и продолжает увеличиваться.

## **ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ**

1. Технологичность конструкций ОП как совокупность её свойств, отражающих влияние конструкции на затраты труда при изготовлении и эксплуатации, закладывается ещё на ранних этапах проектирования, в частности, при разработке принципиальной схемы прибора, его оптической системы.
2. Основными и универсальными показателями ТК при оценке нескольких вариантов в соответствии с ГОСТ 14.201-83 являются:
  - трудоёмкость изготовления изделия  $T_{и}$  ;
  - технологическая себестоимость  $C_{т}$  .
3. Как известно, затраты общественного труда на производство продукта выражаются формулой:

$$C = C_{п} + C_{т},$$

где  $C$  – совокупные затраты общественного труда, стоимость продукта;

$C_{п}$  – затраты прошлого, овеществлённого труда;

$C_{т}$  – затраты живого труда или вновь созданная стоимость.

Известно также, что экономическая эффективность применения машин определяется их воздействием на снижение затрат труда, стоимость продуктов. Обобщающим критерием экономической эффективности машин служит экономия совокупного рабочего времени. Эту идею достаточно образно выразил ещё К. Маркс, отметив, что, «если рассматривать машины исключительно как средство удешевления

продукта, то граница их применения определяется тем, что труд, которого стоит их производство, должен быть меньше того труда, который замещается их применением», (см. Маркс К., Энгельс Ф. Соч. Т. 23, с. 404).

Анализируя в этой связи структуру производственного процесса изготовления оптических приборов и степень механизации работ на каждом этапе производства, представленные в укрупнённом виде в табл.1, можно прийти к следующему выводу.

Так как экономия затрат живого труда пропорциональна доле трудоёмкости работ, выполненных полностью механизированным способом, то для повышения производительности труда и снижения себестоимости изготовления продукции следует перемещать центр тяжести в изготовлении прибора на более раннюю стадию производства – со сборки на механообработку, с механообработки – на заготовительные операции (точный прокат, точное литьё, штамповка, порошковая металлургия и т.п.), где степень механизации работ выше.

Таблица 1

| Этапы производства       | Степень механизации работ |
|--------------------------|---------------------------|
| Заготовительные операции | 85 – 90 %                 |
| Механическая обработка   | 60 – 70 %                 |
| Сборка                   | 10 – 15 %                 |

4. Методы сборки располагаются по убывающей производительности труда сборочных работ в следующем порядке:

- с полной взаимозаменяемостью;
- с неполной взаимозаменяемостью;
- с групповой взаимозаменяемостью;
- с регулировкой компенсаторами;
- с результативной обработкой или механизированной пригонкой;
- с пригонкой индивидуальной, выполняемой вручную.

5. Принцип узловой взаимозаменяемости.

Реализация этого принципа означает перенесение центра тяжести сборочных работ с общей (окончательной) сборки на узловую (предварительную), что способствует сокращению цикла сборочных работ вследствие расширения фронта работ. Обеспечение узловой взаимозаменяемости даже не по всем, а хотя бы по некоторым основным параметрам приводит к упрощению процесса общей (окончательной) сборки, к снижению требуемой для сборки квалификации работников.

6. Специфические особенности оптического приборостроения и, прежде всего:

- применение для изготовления основных схемных элементов ОП – оптических деталей – комплекса оптических материалов с разнообразными физико-химическими свойствами, обусловившими всю сложность, специфичность и многообразие технологий оптического производства;

- предельно высокая геометрическая точность изготовления оптических деталей при огромном размерном диапазоне и предельно высокие требования к чистоте и шероховатости их поверхностей, а также высокая себестоимость изготовления;

- недопустимость напряжений и ничтожных деформаций оптических деталей, ударов и прикосания к ним пальцами или инструментом, резких перепадов температур;

- функциональная взаимосвязь деталей в системе, требующая высокой точности взаимного ориентирования деталей (нередко по нескольким степеням свободы) и базирования с использованием нематериальных баз и оптических методов контроля;

- применение в процессе производства сложной контрольно-юстировочной аппаратуры, стоимость которой может многократно превышать стоимость самих изделий;

- требования климатических ограничений, чистоты и виброизоляции в производственных помещениях;

- широкое применение труднообрабатываемых конструкционных материалов, в том числе нержавеющей легированных сплавов, титана, бериллия;

- высокий удельный вес сборки юстировки и контроля в общей трудоёмкости изделия и низкий уровень механизации и автоматизации этих процессов;

- высокая наукоёмкость современных ОП, применение принципиально новых конструктивных решений, базирующихся на последних достижениях в области микроэлектроники, оптики, физики твёрдого тела;

- продолжающаяся миниатюризация конструкций изделий.

#### 7. Выбор метода юстировки.

Различают два метода юстировки. Первый из них заключается в том, что все элементы оптической системы последовательно устанавливаются в заданное положение с точностью, обеспечивающей требуемые свойства системы. При втором методе юстировки большинство элементов оптической системы устанавливают «произвольно» (приблизительно точно), а накопленную погрешность сборки и изготовления деталей компенсируют подвижками других, заранее выбранных элементов оптической системы.

Первый метод прост в части инженерного обеспечения, хотя и более трудоёмок. Его простота обуславливается также возможностью расчленения операции на элементарные переходы. Увеличение трудоёмкости здесь связано ещё и с затратами на оснащение.

Второй метод, наоборот, требует большой инженерной подготовки, глубокого понимания физических процессов, положенных в основу работы прибора, знания теории ошибок, aberrаций и возможности их взаимной компенсации. Очевидно, этот метод юстировки в чистом виде возможен или при однопараметрической юстировке (например, получение изображения в заданной точке поля, устранение наклона изображения, устранение комы на оптической оси) или же при многопараметрической независимой юстировке, когда устранение одного из дефектов юстировки не вызывает нарушение ранее достигнутого состояния системы и появление новых дефектов. Опыт показывает, что метод юстировки с компенсацией легче реализуется в системах с последовательным расположением ряда «однородных» элементов, например, плоских зеркал (в проекционных системах) или линз (в многолинзовых объективах).

При первом методе юстировки легче отыскать причину дефекта на выходе прибора (например, в изображении). Процесс этот сводится лишь к проверке частных требований в отношении сборки того или иного узла и к его установке в системе.

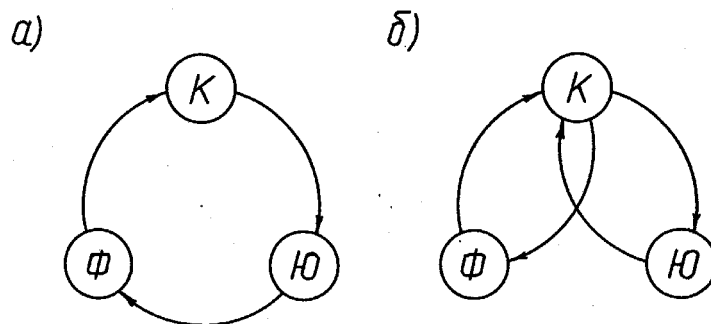
Анализ действующих методик юстировки, обеспечивающих наименьшие затраты труда, показывает, что в них рациональным образом сочетаются элементы как первого, так и второго метода сборки.

#### 8. Принцип статической определимости.

Для точной и надёжной работы механизма прибора, а также точного выполнения предписанных функций схемными элементами конструкции необходимо, чтобы в механизме, его кинематических парах и соединениях отсутствовали избыточные связи. Они вызывают объёмные деформации звеньев и значительное трение в кинематических парах, что существенно снижает точность функционирования механизма, ускоряет износ. Большие напряжения в элементах механизма, как следствие его избыточных связей, снижают надёжность его работы в случае действия знакопеременных нагрузок. В этом случае материал сильно напряжённых элементов механизма быстро устаёт [17].

Избыточное базирование в соединениях и избыточные связи в механизмах всегда приводят к усложнению технологии и повышению трудоёмкости изготовления деталей и сборки – как правило, за счёт ужесточения допусков и увеличения объёма пригоночных операций.

9. Всякая операция юстировки ОП состоит из трёх последовательных, взаимообуславливающих, функциональных этапов (переходов): контроля (К) или выявления ошибки, собственно юстировки (Ю) или базирования и фиксации (Ф) достигнутого положения, - соподчинённость которых представлена схемами, приведёнными на рис.1. При этом в обоих случаях имеет место цикл, у которого начало и конец совпадают с этапом контроля (К) операции юстировки. Общая трудоёмкость операции зависит от затрат времени на каждом из трёх этапов юстировки, что определяется прежде всего схемой прибора и допусками на установку схемных элементов или же выходные параметры системы, а также степенью соответствия его (ОП) конструкции и выбранных методов и средств контроля требованиям простоты, производительности и надёжности выполнения этих этапов операции.



*Рис.1. Два варианта структурной схемы операции юстировки*

Недостаточная точность или информативность средств контроля, недостаточная чувствительность и зависимый характер юстировочных подвижек, отсутствие возможности оценки производимого перемещения, уводы при фиксации обуславливают необходимость повторения всего цикла операции юстировки. Кроме того, общая трудоёмкость операции определяется также степенью разобщённости этапов юстировки в пространстве и во времени.

10. Принцип кратчайшей размерной цепи.

Повышение точности замыкающего звена размерной цепи может быть достигнуто без ужесточения допусков на составляющие звенья – путём сокращения числа звеньев размерной цепи.

11. Принцип единства и совмещения баз – конструкторских, технологических, измерительных.

## **КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

Как правило, формулировке тех или иных критериев должна предшествовать выработка исходной позиции (идеологии), то есть системы основополагающих установок в теории рассматриваемого вопроса. Здесь существо исходной позиции отражают сформулированные выше основные принципы анализа ТК.

Поскольку создание прибора начинается с разработки его принципиальной и структурной схем, а также выбора исходной оптической системы, то одними из первых должны быть названы критерии оценки ТК, присущие этому этапу проектирования.

1. Чувствительность оптической системы к технологическим погрешностям её конструктивных элементов и возможность компенсации этих погрешностей в процессе юстировки (коррекционные возможности оптической системы).

В настоящее время благодаря широкому использованию ЭВМ на всех стадиях проектирования влияние погрешностей изготовления конструктивных элементов на оптические характеристики системы может быть оценено на стадии абберационного расчёта. При этом приемлемыми для серийного производства принимаются следующие допуски [18]: подгонка под пробное стекло  $N = 1$  кольцо, отклонение радиусов пробного стекла от номинала  $\Delta r/r = 0,1\%$ , допуск на толщины линз и воздушные промежутки  $\Delta d_i = 0,01$  мм, отклонения показателей преломления для основной длины волны  $\Delta n_{\lambda_0} = 0,0003$  и дисперсии  $\Delta(n_{\lambda_2} - n_{\lambda_1}) = 0,00003$ . Получаемые результаты позволяют оптику-конструктору судить о чувствительности создаваемой им системы к погрешностям технологического процесса.

Опыт создания оптических систем с повышенными оптическими характеристиками показывает, что чувствительность конструктивных элементов к погрешностям изготовления заложена в исходной конструкции системы [19, 20].

2. Наличие и число избыточных связей в механизмах приборов, в кинематических парах, соединениях.

Избыточные связи в соединениях могут вызвать недопустимые деформации точных направляющих, преломляющих и отражающих поверхностей оптических деталей, внутренние напряжения в них, увеличение трения в подвижных соединениях из-за деформации несущих (базирующих) элементов.

Избыточные связи в механизмах и кинематических парах не позволяют избежать при сборке натяга, а, следовательно, объёмных деформаций звеньев, значительного трения в кинематических парах, что

приводит к снижению чувствительности установочных и шаговых перемещений ведомых звеньев механизма и точности позиционирования чувствительных элементов прибора.

Наличие избыточных связей в механизмах заставляет ужесточать допуски на размеры деталей, прибегать к пригонкам. При этом число избыточных связей для многих механизмов равно числу размеров, требующих точного выполнения.

Механизмы без избыточных связей допускают сборку по методу взаимозаменяемости, в то время как в механизмах с избыточными связями добиться взаимозаменяемости принципиально невозможно.

Таким образом, наличие избыточных связей приводит к усложнению технологии и повышению трудоёмкости изготовления деталей и сборки механизмов. Технология тем сложнее, а трудоёмкость изготовления механизмов тем выше, чем больше число избыточных связей в механизме и чем меньше жёсткость его звеньев [13].

3. Степень расчленения конструкции (способность к расчленению) на самостоятельные, функционально законченные СЕ, которые можно собирать, контролировать и испытывать параллельно и независимо друг от друга. Разделение прибора на самостоятельные узлы в местах с наименьшим числом и наименьшей жёсткостью межузловых (оптических, механических, электрических и др.) связей. Иными словами – разделение прибора на узлы по принципу наименьшего влияния погрешностей их взаимного ориентирования.

Возможная степень дифференциации процесса сборки с точки зрения однородности работы по специальности и квалификации исполнителей.

Экономия трудовых затрат при этом достигается не только за счёт рациональной организации труда, сокращения цикла сборочных работ и упрощения процесса общей сборки, но также за счёт того, что на сборке узлов (в отличие от общей сборки) облегчены условия применения средств технологического оснащения. Кроме того, расчленение изделия на самостоятельные СЕ и возможность параллельной сборки способствует повышению качества сборки и уменьшает влияние дефицита отдельных деталей на ритмичность выпуска.

4. рациональность компоновки изделия (сборочной единицы), предполагающая:

- наличие базового элемента – детали или узла, являющегося основой для расположения остальных деталей и узлов;
- возможность осуществления сборки при неизменном положении базового элемента, либо же при минимальном числе различных позиций



этого элемента, а также при неизменном базировании составных частей изделия (СЕ);

- возможность установки комплектующих деталей или СЕ на базовый элемент простейшим движением;
- возможность обеспечения непрерывного (поточного) характера технологии сборки, исключающего необходимость промежуточной разборки и повторной сборки;
- удобный и свободный доступ к местам, требующим контроля, регулировки и проведения других работ, предусмотренных технологией сборки или методикой юстировки, доступность указанных мест для применения рабочего и мерительного инструмента, сборочных приспособлений и средств контроля.

5. Трудоемкость методов контроля при изготовлении деталей и сборке ОП. Прежде всего – трудоемкость контроля отклонений от расчётных параметров и характеристик у отдельных элементов или системы (прибора) в целом, взаиморасположения функциональных элементов, формы и деформации волнового фронта, анализа структуры изображения, а также идентификации погрешностей технологического процесса.

Простота аппаратурной реализации и обработки результатов, оперативность и надёжность контроля в сочетании с высокой чувствительностью.

Возможность применения типовых методов контроля, стандартной и универсальной контрольно-юстировочной оснастки.

Возможность автоматизации контроля с обработкой данных на ЭВМ.

6. Общее количество деталей в конструкции, количество сложных и ответственных деталей и узлов. Использование стандартных, нормализованных и унифицированных деталей и узлов. Применение в конструкции деталей, полученных методами прогрессивного формообразования (точное литьё, штамповка, прокат и др.)

Вполне очевидно, трудоемкость сборки возрастает как с увеличением числа соединений, так и с повышением их сложности, что определяется степенью отработки конструкции и технологии изготовления этих деталей и СЕ. Детали, полученные методами прогрессивного формообразования, в большей степени, чем детали, прошедшие длинную цепь механических операций и разных исполнителей, характеризуются стабильностью свойств и размеров и потому в меньшей степени нуждаются в разного рода доделках и пригонках, как снятие грата, рассверливание отверстий и т.п.

7. Экономически обоснованный уровень взаимозаменяемости деталей и узлов. Применение и рациональный выбор компенсаторов,

позволяющих понизить требования к точности взаимного ориентирования составных частей изделия и исключить промежуточные сборки. Минимальное число пригонок. Использование пригонок с удалением слоя материала с детали- компенсатора.

8. Число звеньев размерной цепи и величины их передаточных коэффициентов.

Эти характеристики узла совместно с допусками на размеры составляющих звеньев размерной цепи и на размер замыкающего звена определяют выбор метода сборки – от полной взаимозаменяемости до сборки с компенсацией, то есть с юстировкой. Чем больше передаточные коэффициенты звеньев, тем более тонкая юстировка требуется и тем больше затраты – трудовые и материальные.

9. Наличие в конструкции достаточного минимума надёжных и удобных баз, обеспечивающих требуемое положение деталей и узлов без подгонки и возможность простого, точного и производительного контроля правильности выполнения сборки и юстировки.

Степень определения материальными (то есть непосредственно контактирующими при базировании) конструкторскими базами узла положения нематериальных, оптических баз содержащегося в нём схемного элемента. Она характеризуется числом связей, наложенных на КБ узла со стороны его оптических баз, обеспечивающих в результате достигнутого расположения требуемые свойства оптической системы. Чем больше необходимых связей наложено на КБ, тем меньше регулировок требует такой узел и тем проще сборка. Число необходимых юстировочных подвижек  $g$  определяется по формуле:

$$g = 6 - m - n,$$

где  $m$  – число связей, наложенных на конструкторские базы со стороны оптических баз, а  $n$  – число оставшихся степеней свободы, инвариантных для оптического элемента.

10. Применение в конструкции лишь необходимого минимума регулировочных подвижек, позволяющего реализовать оптимальный (т.е. с минимальным количеством переходов) процесс юстировки [21]. Предпочтительнее подвижки, обеспечивающие перемещение по одной степени свободы и независимую юстировку, то есть устранение лишь одного определённого параметра деюстировки без внесения при этом других погрешностей. Перемещения по двум и более степеням подвижности должны быть раздельного характера.

Регулировочно-юстировочные устройства должны обеспечивать требуемую точность, обладать необходимой чувствительностью,

достаточной жёсткостью и допускать регулировку в заданных пределах. Юстировочное перемещение оправы с оптическим элементом не должно иметь люфтов и вызывать усилия, возвращающие её в исходное положение.

11. Техничко-экономическая обоснованность выбранного вида соединения, его совместимость с материалом конструкции, её конфигурацией, массой и размерами, требованиями прочности, точности и надёжности, соответствие применяемой типовой технологии, имеющемуся оборудованию, требованиям эксплуатации и ремонта, объёму выпуска и типу производства.

Унификация (устранение многообразия) видов соединений при сборке, применяемых в одном изделии.

Соединение составных частей не должно требовать сложной и необоснованно точной обработки сопрягаемых поверхностей.

Виды используемых соединений, их конструкции и месторасположение должны соответствовать требованиям механизации и автоматизации сборочных работ. Места соединений составных частей должны быть доступны не только для средств механизации сборочных работ, но и для контроля качества соединений.

12. Удобство сборки, заключающееся в использовании простых производительных приёмов, не требующих специального инструмента и сложного технологического оснащения. Возможность применения типовых техпроцессов сборки, стандартной, унифицированной или переналаживаемой технологической оснастки, а также специальных высокопроизводительных методов сборки, например, с применением результативной обработки, механических способов контроля установки (центрирования) деталей и узлов, регулирования с помощью съёмных технологических приспособлений.

13. Качество фиксации регулируемых элементов в процессе сборки или ремонта – свойство конструкции, предусматривающее сведение к минимуму или недопустимость возможных уводов и деформаций юстируемых элементов в процессе закрепления, быстродействие и надёжность фиксации.

14. Ремонтпригодность.

Сокращение сроков ремонта, удобство технического обслуживания и качество выполнения, минимальные затраты на восстановление работоспособности прибора в основном определяются следующими условиями: быстротой обнаружения неисправностей и повреждений; доступностью наиболее вероятных мест обслуживания и ремонта (например,

для проведения регулировки, пригонки, смазки механизмов, чистки оптики, замены изношенной или повреждённой детали и т.д.); лёгкостью и удобством разборки (исключающей возможность повреждения или разрушения деталей) и замены деталей и узлов; степенью взаимозаменяемости деталей и СЕ, их унификацией; преемственностью применяемого оборудования, инструмента и оснастки, включая контрольно-юстировочную. Детали и узлы, имеющие наибольшую вероятность быть повреждёнными и требующие замены в процессе ремонта (кроме случаев, когда такая замена производится из комплекта ЗИП), не должны быть оригинальными – сложными и трудновоспроизводимыми.

## **ПУТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИБОРОВ**

Сформулированные ранее критерии оценки технологичности конструкций оптических приборов позволяют определить вполне конкретные пути её повышения. Кроме того, следует указать и на наличие ГОСТ 14.203-83 «Правила обеспечения технологичности конструкций сборочных единиц», где приведены общие требования к ТК СЕ и сферы проявления эффекта.

1. Выбор исходной конструкции оптической системы, обеспечивающей возможность получения требуемых оптических характеристик, и разработка на её основе оптической системы с технологически устойчивыми характеристиками и необходимыми коррекционными параметрами.

Оптимальное распределение допусков на технологические погрешности, исходя из важнейшего критерия оценки качества оптической системы. Это позволяет обеспечить, в среднем, заданное ухудшение оценочной функции при минимальной трудоёмкости [22].

Уровень оптимизации конструкций оптических систем в значительной степени определяется уровнем анализа свойств базовых элементов, арсенал которых должен постоянно пополняться в результате совершенствования методов расчёта, создания новых оптических материалов, а также совершенствования методов контроля, технологии и производственного оборудования [23]. Так, например, в простейшем элементе оптической системы – одиночной линзе – в зависимости от «прогиба» (при менискообразной форме) обнаруживается различное влияние изменения конструктивных элементов на фокусное расстояние [24]; при разработке новых микрообъективов следует стремиться к

достижению небольших значений основных параметров  $P$ ,  $W^*$  их компонентов и определённого соотношения этих параметров, что обеспечивает существование положения наилучшей установки, то есть положения плоскости предмета и изображения, при котором сферическая аберрация имеет минимальное значение, удовлетворяющее критерию Рэлея [19]. Это позволяет избежать в процессе контроля «заслонения» этой аберрацией компонента искажений в структуре дифракционного изображения точки или искажения волнового фронта, вызванных погрешностями технологического процесса. Таким образом, удаётся повысить чувствительность пооперационного контроля к точности центрировки и возникающим в процессе склеивания линз и крепления (закатки) компонентов в оправках напряжений, деформирующих рабочие поверхности компонентов.

2. Рациональный выбор структурных параметров механизма на основе структурного анализа его схемы с целью минимизации числа избыточных связей в нём.

Разработка механизмов, в которых бы полностью отсутствовали избыточные связи, - задача очень сложная. Один из эффективных путей уменьшения числа избыточных связей в механизме – это замена низших кинематических пар парами более высокого класса. Второй путь – это увеличение числа подвижных звеньев в механизме с целесообразным сочетанием классов кинематических пар, их соединяющих. Любое уменьшение числа избыточных связей в механизме способствует повышению точности и надёжности работы механизма при одновременном снижении трудоёмкости его изготовления.

Если исключить избыточные связи всё же не удаётся, необходимо минимизировать их влияние на эксплуатационные свойства механизма и на ТК. Для этого существует два пути. Первый путь – тривиальный - повышение точности изготовления. Вторым путем – разработкой конструкции, допускающей применение так называемой «взаимокомпенсирующей технологии», позволяющей, например, добиваться у сопрягаемых деталей тождественности размеров, формы и расположения поверхностей.

3. Применение новых принципиальных схем, в основу которых могут быть положены новые физические принципы, новых конструктивных решений и прогрессивных материалов.

---

\* Величины  $P$ ,  $W$ , зависящие только от радиусов поверхностей и от показателей преломления стекол, являются параметрами, полностью определяющими все аберрации третьего порядка монохроматического луча при любом положении предмета и любом положении входного зрачка.

Значительное снижение материалоемкости приборов, трудоёмкости изготовления деталей и сборки достигается в результате применения в конструкциях деталей из пластмасс, керамических, композиционных и других материалов. Технология изготовления деталей из этих материалов малоотходна и относится к высокопроизводительным процессам формообразования. Преимуществами оптических деталей, изготовленных из полимеров, кроме низкой стоимости, являются малый вес, высокая ударопрочность, возможность массового изготовления деталей сложной конфигурации, с асферическими поверхностями и монтажными выступами, что снижает трудоёмкость сборки.

4. Использование при конструировании агрегатно-модульного принципа компоновки прибора. Оптическая, механическая, электрическая системы прибора должны отделяться друг от друга. Это позволяет наиболее гибко организовать производство, использовать преимущества специализации участков, бригад и отдельных исполнителей, заниматься дальнейшим совершенствованием модели.

Типизация конструктивных компоновок и унификация узлов и деталей в пределах однотипных групп приборов, что позволяет использовать ранее разработанную техническую документацию и существующую технологическую оснастку, а также применить поточные методы изготовления.

Следует отдавать предпочтение плоскостной компоновке элементов оптической системы перед пространственной компоновкой. Это упрощает размерную цепь и облегчает достижение необходимой точности взаимориентирования элементов, позволяет применить такой вид регулировки, как подвижка на базе, осуществляемая без посредства специальных устройств, предусмотренных конструкцией, - с помощью съёмных (технологических) регулировочных приспособлений.

5. Расчленение конструкции на большее число подборок – самостоятельных узлов (СЕ), которые можно собирать на ветвях основной линии сборки и подавать к основной линии в соответствующем пункте. В этом случае основная деталь подборки служит как бы сборочным приспособлением, на котором собираются другие детали.

6. При расчленении конструкции на самостоятельные СЕ следует располагать схемные элементы, между которыми (в соответствии с заданными требованиями и функционированием системы) устанавливаются сложные или жёсткие связи, в сборочной единице наименьшей сложности (с учётом массы, габаритов, стоимости) таким образом, чтобы был обеспечен доступ к этим элементам для регулировки или пригонки.

Здесь степень сложности связей определяется их числом, например, числом действенных подвижек у элементов оптической системы, а жёсткость связей характеризуется допусками на относительное смещение элементов. Локализация пригонок и регулировок приводит к их упрощению, облегчает возможность применения средств технологического оснащения, позволяет повысить достижимую точность.

#### 7. Совершенствование методов и средств контроля.

Использование средств телевизионной техники при разработке оптико-измерительных информационных систем контроля в оптическом производстве, создающих комфортность и дополнительные возможности групповой экспертной оценки качества системы, а также обеспечивающих автоматическое считывание изображения и его обработку с помощью вычислительной техники.

Разработка и внедрение методов и средств комплексного контроля изделия (узла или прибора), что позволяет значительно сократить время контроля, в особенности при зависимом характере юстировки. Применение контроля раздельного характера, при котором выявляется лишь один, а не все параметры деюстировки, может быть оправдано лишь при условии независимой юстировки.

Способ контроля должен давать информацию в таком виде, чтобы можно было легко и быстро получить данные о величине и характере требуемой компенсации. Выполнение этого требования даёт значительный эффект в тех случаях, когда этапы собственно юстировки и контроля разделены во времени из-за необходимой разборки изделия для осуществления требуемой компенсации и повторной сборки. Применение же качественного метода контроля должно быть подкреплено конструктивно непрерывным характером регулирования, а также возможностью совмещения во времени этапов юстировки и контроля.

При разработке схем контроля следует отдавать предпочтение прямым методам контроля перед косвенными, если выполнение первых не сопряжено с большими материальными и трудовыми затратами. В этом случае обеспечивается более высокая точность, так как образуется кратчайшая размерная цепь, звеньями которой выступают непосредственно технологические погрешности основных схемных элементов – изготовления и взаимного расположения.

Высокой чувствительностью и вместе с тем простотой и компактностью отличаются автоколлимационные схемы контроля. В качестве отражателей в таких схемах, кроме плоских зеркал, применяют

также призмы типа БР-180° и БкР-180° в зависимости от заданного схеме свойства.

Если контролируемый дефект сложной системы является результатом погрешностей, возникших в процессе сборки отдельных её элементов, узлов (например, компонентов сложного объектива), и компенсация этого совокупного дефекта, выявляемого лишь в готовом изделии, затруднительна, необходимо предусмотреть поузловой (пооперационный) контроль, предварительно сформулировав исчерпывающие требования к сборке каждого узла (к операции), разработав соответствующие схемы контроля и рассчитав элементарные допуски, которые бы позволили ограничить величину контролируемого дефекта на выходе изделия заданным допуском.

Простота и доступность контроля в сочетании с высокой точностью (при базировании деталей и узлов в процессе сборки ОП) может быть достигнута применением хорошо апробированных приёмов и методов металлообработки и механической сборки. Это – разметка положения деталей и узлов, а также проекции оптической оси на плоскости базирования оптических элементов; центрирование отверстий, базирующих последовательно расположенные компоненты оптической системы, с помощью так называемых прошивок – гладких или ступенчатых валиков; контроль и центрирование при вращении в центрах, на призме, на станке; применение плоских и пространственных шаблонов, позволяющих установить деталь или СЕ в заданное размерной цепью положение; различных калибров, концевых мер длины, индикаторов, рейсмусов, угольников, элементов УСП (универсально-сборных приспособлений), отвесов и т.п.

Особые возможности для решения сложных специфических задач контроля узлов ОП, связанных, например, с использованием при базировании нематериальных оптических баз, предоставляет применение, в дополнение к известным универсальным средствам, широкой гаммы специальных приборов для линейных и угловых измерений, универсальных измерительных приборов, автоколлимационных визирных труб с глубокой фокусировкой и автоколлимационных микроскопов на универсальных штативах с точным позиционированием в пространстве.

8. Установление оптимального, экономически обоснованного для данного объёма выпуска и типа производства метода сборки и соответствующих ему допусков, полученных в результате расчёта и анализа многозвенных размерных цепей. Необходимое расширение допусков, при



обеспечении требуемого качества сборки может быть достигнуто применением компенсации.

9. Повышение роли КБ в определении заданного положения деталей и узлов в изделии, обеспечении требуемого функционирования его систем. Стремление к наиболее полному определению конструкторскими базами положения схемных элементов путём наложения необходимого числа связей на КБ со стороны баз этих элементов.

Введение дополнительных технологических баз у самих схемных элементов, у деталей, несущих эти элементы, и у корпусных, позволяющее увеличить число накладываемых на КБ связей в процессе узловой сборки, а также обеспечивающее гибкость в выборе методов и средств контроля на этапе общей сборки. При этом дополнительные затраты невелики и многократно окупаются на сборке вследствие упрощения процесса и повышения его производительности.

Экономичным и производительным способом наложения размерных связей на КБ узлов оптической системы является результативная обработка. Возможно применение приспособления для точного ориентирования оптического элемента по отношению к КБ оправы перед креплением. Эффективно такое базирование элемента оптической системы, которое лишает его подвижностей, действенных в данной оптической системе, и особенно, наиболее опасных (нежелательных) для требуемого функционирования системы.

Следует, например, базировать плоское зеркало на плоскость, параллельную самому зеркалу, а угловое зеркало и призмы ему эквивалентные – на плоскость, перпендикулярную ребру углового зеркала.

Применение результативной обработки баз после сборки предполагает возможность замены механического крепления оптических деталей – приклеиванием, что способствует уменьшению числа деталей в конструкции.

10. Разработка научно обоснованной методики юстировки, выбор принципиальной схемы компенсации погрешностей и разработка на её основе рациональной конструкции регулировочных устройств для осуществления юстировочных подвижек элементов оптической системы.

Научно обоснованной следует считать такую методику юстировки, которая, опираясь на современные методы и средства контроля, обеспечивает выполнение предъявляемых к изделию и реализуемых в процессе юстировки технических требований кратчайшим путём и с наименьшими затратами при сохранении эксплуатационных свойств изделия – надёжности и ремонтпригодности. Разработанная на основе

принципиальной схемы изделия и требований технических условий – методика юстировки становится одним из руководящих документов при отработке ТК, позволяющим добиться наилучшего соответствия конструкции изделия установленному методу сборки, а также выбранным методам и средствам контроля. При этом в конструкции должны быть предусмотрены базы, обеспечивающие требуемое положение изделия на сборочном стенде или приспособлении, установку или выверку средств контроля, надёжный и простой контроль установки схемных элементов. Конструкция должна обеспечивать удобный доступ к местам регулировки без частичной разборки изделия и возможность перемещения юстируемого элемента по требуемой координате на заданную величину.

При разработке методов и средств контроля следует учитывать необходимость приближения мест индикации (наблюдения) результатов контроля и юстировки к местам расположения элементов управления юстировочными перемещениями, обеспечивая тем самым возможность совмещения во времени операций контроля и юстировки. В том случае, когда операции контроля и юстировки, то есть выявления и устранения первичных погрешностей, разделены во времени необходимостью частичной разборки и повторной сборки, перенастройки средств контроля, проведения повторных измерений и обработки их результатов или по причине удалённости мест расположения устройств регулировки и мест индикации результатов контроля, необходимо, чтобы разрабатываемые методы и средства контроля позволяли получить полную информацию о первичных погрешностях или компенсирующих подвижках – величину, знак и направление. Это требование приобретает особое значение, когда в качестве метода компенсации применяется пригонка. Последняя предпочтительнее регулировки, если способствует существенному упрощению конструкции, следовательно, повышению её надёжности в особенности при высоких требованиях к точности взаимного расположения схемных элементов и высокой чувствительности системы к погрешностям их установки по абсолютному большинству степеней подвижности.

При назначении компенсаторов технологических погрешностей следует стремиться к тому, чтобы число компенсаторов равнялось числу устраняемых параметров деюстировки. Увеличение числа компенсаторов часто бывает вызвано противоречивостью требований иметь достаточно большой диапазон и высокую чувствительность регулировки. Пределы регулирования и параметры компенсаторов (номинальный размер, предельные отклонения, величина ступени, чувствительность) должны рассчитываться на основе анализа размерных цепей и заданного допуска на

замыкающее звено. Решению ввести специальный компенсатор в конструкцию должен предшествовать тщательный анализ возможностей возложить необходимые функции компенсации на один из основных схемных элементов.

Довольно часто, когда отклонение выходной характеристики изделия является следствием влияния нескольких однородных первичных погрешностей, оказывается выгодным не устранять каждый из источников суммарного дефекта в отдельности, а воздействием на один из них добиться полной взаимокompенсации их влияния.

Не следует «перегружать» какой-либо элемент системы функциями нескольких компенсаторов. Нередко это приводит к необоснованному усложнению конструкции, к снижению её жёсткости и ухудшению надёжности. При этом возникают трудности в реализации принципа независимости юстировки. При наличии альтернативы необходимо руководствоваться следующими критериями выбора компенсатора, перечисленными в порядке их значимости:

- 1) требуемая чувствительность и надёжность,
- 2) независимость юстировки и производительность,
- 3) стоимость.

Значительное упрощение схемы компенсации и конструкции может быть достигнуто, если заведомо пренебречь принципом независимости юстировки, что возможно в случаях, когда возникающие при выбранной схеме юстировки побочные дефекты пренебрежимо малы и легко компенсируются на последующих этапах операции. Так, иногда необходимый сдвиг элемента осуществляют малым поворотом его вокруг вынесенной оси. Следует отметить, что регулировочные устройства для осуществления поворотов (наклонов) в конструктивном отношении оказываются проще аналогичных устройств для поступательных перемещений.

Регулировочные устройства, предназначенные для тонкого поискового позиционирования на стадии окончательной юстировки, должны обладать плавностью, при которой пороговые перемещения не превышали бы требуемых точностей установки схемных элементов, и скоростью, обеспечивающей надёжное обнаружение необходимого эффекта и быстрое отыскание положения наилучшей установки. Разумеется, что в таких устройствах должны быть устранены или сведены к минимуму люфты. Желательно также, чтобы тонкие юстировочные перемещения были независимого характера или же возникающие в процессе юстировки побочные дефекты легко обнаруживались и устранялись.

Обеспечиваемая плавностью движения и передаточным отношением механизма регулировки требуемая чувствительность юстировочных подвижек, при условии перемещения на малый ход или угол, легче реализуется применением направляющих на упругих элементах, среди которых наибольшее распространение получили: шарнир из пластинчатой пружины, крестообразный пружинный шарнир, пружинный параллелограмм. Направляющие этого типа свободны от люфтов и трения, просты в изготовлении и к тому же не передают напряжений (деформаций), развивающихся в несущих элементах конструкции, оптическому элементу.

В конструкциях, содержащих плоские зеркала и отражательные призмы, малые смещения которых используются при юстировке системы (чаще всего для её центрирования), следует назначать подвижки, исходя из принципа наименьших наклонов и сдвигов зеркал и призм, обеспечивающего при последовательном приближении быстрое «затухание» амплитуды производимых подвижек. В соответствии с этим принципом можно дать следующие практические рекомендации.

1. Отклонение от базовой оси кардинальной точки, расположенной на большем удалении от зеркала (или призмы, ему эквивалентной), следует устранять наклоном, а аналогичное отклонение близлежащей точки – сдвигом зеркала или самого схемного элемента, которому эта кардинальная точка принадлежит.
2. При наличии в оптической системе двух и более последовательно расположенных плоских зеркал, выполняющих в ней компоновочную функцию, юстировку (точнее, центрирование) системы, обусловленную погрешностями установки этих зеркал, выгоднее производить исключительно угловыми подвижками двух зеркал, устраняя отклонение от базовой оси соответствующей кардинальной точки наклонами зеркала, наиболее от неё удалённого. Такими кардинальными точками в юстируемой системе могут быть, например, центр выходного зрачка проекционного объектива и осевая точка плоскости изображения.
3. Если, при тех же условиях, в процессе юстировки следует устранить ещё и поворот плоскости изображения вокруг оптической оси, выбор компенсаторов – угловых подвижек того или иного зеркала и последовательности их применения должен производиться с учётом типа и свойств зеркальной системы, которая представляет собой совокупность плоских зеркал, а также передаточных коэффициентов выбранных подвижек. Эти передаточные коэффициенты зависят от ориентации оси поворота и от угла падения осевого луча на зеркало, а при фиксированном значении этого угла принимает наибольшее, по абсолютной величине,

значение при наклоне зеркала вокруг оси, параллельной линии пересечения отражающей плоскости с плоскостью падения. При этом угол поворота изображения вокруг оптической оси пропорционален синусу угла падения, а отклонение луча в направлении перпендикулярном плоскости падения – косинусу этого угла.

4. Более строгие допуски на взаимное расположение КБ, определяющих положение схемных элементов, следует задавать на КБ, наиболее удалённые от зеркала.

Уменьшению трудоёмкости юстировки, как отмечалось, способствует разработка конструкций регулировочных подвижек оптических элементов независимого характера. Так, например, оси поворота зеркала должны совпадать с точкой падения на него осевого луча или располагаться рядом с ней, причём одна из осей должна быть перпендикулярна плоскости падения этого луча, а вторая, перпендикулярная первой, должна быть параллельна отражающей плоскости либо одному из осевых лучей – падающему или отражённому. Это позволит с устранением децентрировки одного рода избежать появления децентрировки другого рода, а также изменения оптической длины хода лучей, приводящего к расфокусировке. Фокусировочное перемещение объектива, выполняемое, как правило, после устранения в системе децентрировок обоёго рода, не должно вызывать его перекосов и сдвигов перпендикулярно оптической оси.

Назначая подвижки призм, установленных в сходящемся ходе лучей, необходимо учитывать влияние на качество изображения наклона их развёрток, а потому рассчитывать пределы требуемой компенсации. Чем больше геометрическая длина хода лучей в призме и чем больше средняя дисперсия стекла, из которого она изготовлена, тем меньшим диапазоном угловых подвижек приходится располагать. Разрабатывая схемы базирования и регулировочные подвижки для сложной зеркально-призменной системы (имеющей два и более отражений), необходимо исходить из задач юстировки, возлагаемых на эту систему (отклонение луча, устранение децентрировки, поворот и сдвиг изображения, фокусировка и т.п.) и свойств данной ЗПС, раскрытию которых способствует нахождение простейшей зеркальной системы, эквивалентной данной. Знание свойств ЗПС, а следовательно, и её особых направлений (осей), позволяет рациональным образом выбирать схемы базирования и назначать юстировочные подвижки независимого характера.

11. Разработка и применение контрольно-юстировочного приспособления, воплощающего в себе технические и организационные идеи,

заложенные в методике юстировки. Предназначенное специально для юстировки и контроля определённого узла (изделия) и воспроизводящее, в необходимых случаях – полностью, условия его работы в приборе, приспособление обеспечивает его надёжное базирование, комплексный контроль и представление результатов в удобном виде, доступ к местам регулирования, требуемое позиционирование и фиксацию юстируемого элемента и в итоге – высокое качество сборки и производительность операции.

12. Использование при конструировании деталей метода интеграции – объединения в одной детали (путём её усложнения) нескольких деталей, сложных и простых, требующих в соединении точную взаимосвязь поверхностей. Эффективность изготовления таких деталей, например, сложных корпусных, значительно возросла с применением групповой технологии и станков с ЧПУ, в особенности многооперационных.

Применение деталей сложной конфигурации, получаемых методами точного литья, объёмной штамповки, использование армированного литья, что также позволяет уменьшить число деталей.

Применение в конструкциях ОП деталей и узлов из штампованных, гнутых, профильных и калиброванных материалов, взамен фрезерных и точёных.

13. С целью облегчения производственных приёмов сборки необходимо придерживаться следующих правил:

- детали, сопрягаемые в осевом направлении, по кромкам поверхностей должны иметь конструктивные элементы (фаски, направляющие расточки и т.п.), облегчающие самоустановку и самоцентрирование поверхностей;
- при сборке деталей по двум посадочным местам необходимо соблюдать правильную последовательность входа элементов деталей на места посадок, что обеспечивается заданием таких линейных размеров, при которых начальный контакт каждой пары сопрягающихся поверхностей осуществляется не одновременно, а последовательно;
- при последовательной установке нескольких деталей с натягом следует избегать посадки по одному диаметру;
- перемещение детали по участкам с неподвижной посадкой должно быть минимальным, что достигается введением выборки, - это уменьшает усилия при сборке и предотвращает нарушение посадки на протягиваемой детали;
- шероховатость сопрягаемых поверхностей деталей, предельные отклонения формы и расположения поверхностей должны быть обоснованы во избежание заклинивания деталей в процессе сборки и для обеспечения требуемого качества соединений.

14. Применение специальных конструктивных решений, направленных на сокращение затрат при техническом обслуживании, ремонте и изготовлении запасных частей:

- предусмотрение удобных и эффективных устройств выверки и регулировки приборов, его систем, узлов или отдельных элементов;
- наличие меток спаренности у деталей, взаимное расположение которых обусловлено конструкторско-технологическими особенностями;
- рациональное распределение материала в парах трения, выбор точности и качества поверхностей деталей с целью обеспечения долговечности, плавности перемещений, длительности сохранения заданной конструктором точности и посадки и т.д., что достигается применением так называемых обратных пар трения, у которых деталь с меньшей поверхностью трения имеет и меньшую твёрдость трущейся поверхности, а также применением технологических процессов упрочнения рабочих поверхностей, таких, например, как вибронакатывание;
- защита пар трения от попадания пыли, а в отдельных случаях и обеспечение герметичности для исключения утечек рабочей среды (жидкости, газа, пара и т.д.);
- введение специальных деталей – компенсаторов, (например, втулки, планки, кольца, шайбы) и подвижных (например, клинья, конусные втулки, эксцентриковые оси), позволяющих компенсировать износ деталей;
- применение на быстроизнашивающихся деталях, в особенности сложных, сменных частей – втулок, подпятников и т.п.

Быстрому восстановлению работоспособности прибора способствует предусмотренные конструкцией:

- возможность перестановки односторонне изнашивающихся частей для работы их симметричной стороной;
- унификация элементов, позволяющая поменять местами идентичные детали и узлы, неодинаково изнашивающиеся (например, прецизионные шарикоподшипники – коренной и прижимной – в каретке измерительных приборов типа УИМ и ДИП);
- возможность перестановки детали на  $180^\circ$  в случае неодинаковых требований к симметрично расположенным её элементам, один из которых может оказаться повреждённым (например, преломляющие грани светоделительного кубика);
- возможность сдвига ролика с повреждённой дорожки направляющей (например, в вышеупомянутых приборах это достигается установкой шайб под фланцы осей шарикоподшипников).

15. Совершенствование уровня технологии и производственного оборудования.

## **ЧАСТЬ ВТОРАЯ**

### **ПРИМЕРЫ АНАЛИЗА И ОТРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

#### **РАЗРАБОТКА НОВЫХ СХЕМ И ОРИГИНАЛЬНЫЕ КОНСТРУКТОРСКИЕ РЕШЕНИЯ**

Прежде чем приступить к анализу конкретных схем и конструктивных решений, вновь обратимся к Государственному стандарту [1]. Он трактует понятие технологичность, как «совокупность свойств конструкции изделия, определяющих её приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве, эксплуатации и ремонте для заданных показателей качества, объёма выпуска и условий выполнения работы». Это сложное определение включает в себе ту принципиально важную мысль, что сравнивать по технологичности допустимо лишь конструкции одного назначения, создаваемые в условиях определённого действующего производства и при одинаковых показателях качества. Первое условие не требует пояснения, так как едва ли может возникнуть мысль сравнивать технологичность, например, объектива фотоаппарата и объектива микроскопа. Не менее ясным является и второе условие, а вот требование «заданного (одинакового) показателя качества» заслуживает более подробного рассмотрения.

В 70-х годах девятнадцатого столетия известный немецкий учёный Аббе создал первый комплект объективов микроскопов, названных им ахроматами. Оптическая конструкция не претерпела существенного изменения до настоящего времени, несмотря на появление новых сортов стёкол и широкое использование ЭВМ в практике современных оптических расчётов. На основе этих конструкций выпускались и отечественные микрообъективы – ахроматы М-42, ОМ-41 и другие, входившие в комплект серийного биологического микроскопа «Биолам – Р». Качеством, которое определило «живучесть» этих оптических систем, является технологичность. Ведь ахроматические объективы микроскопов выдержали серийность в несколько десятков тысяч в год при самых высоких требованиях к качеству изображения.

И, тем не менее, развитие таких наук, как биология, цитология, генетика, развитие медицины, таких областей промышленности, как

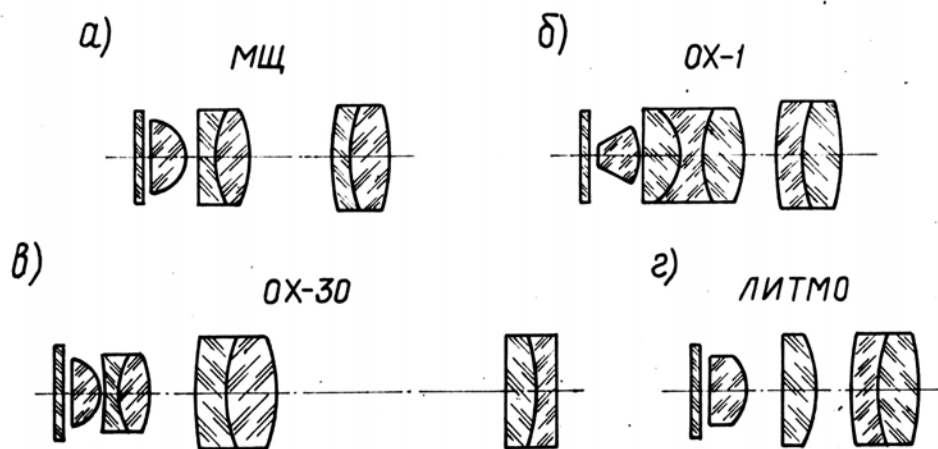


электроника, выдвигает требование дальнейшего повышения качества изображения объективов микроскопов. Ведь ахроматы имеют близкое к идеальному (дифракционное) качество изображения лишь в центральной части поля зрения и то не для всей области спектра, в которой чувствителен глаз человека. А в настоящее время нужны объективы, способные различать и воспроизводить в неискажённом виде тончайшие структуры биологических клеток, не превышающие десятых долей микрометра. Без микроскопов, оснащённых объективами  $40\times$  и более, создающих одинаково резкое изображение по всему полю зрения, невозможен процесс нанесения микросхем, количество которых на одном квадратном миллиметре достигает в настоящее время сотен элементов, а, следовательно, немыслима дальнейшая миниатюризация ЭВМ.

К современным объективам микроскопов предъявляются не только требования больших увеличений, достигающих до  $100\times$ , но и требования идеального качества изображения в пределах всего наблюдаемого поля зрения для всей области видимого спектра. Очевидно, что в этих условиях оптическая система объектива неизбежно будет усложняться, а вместе с этим будет повышаться и чувствительность такого объектива к погрешностям технологического процесса. Так правильно ли сравнивать технологичность таких объективов с технологичностью ахроматов? Ведь качество у ахроматов и план-объективов разное, да и серийность их отличается, по крайней мере, на порядок.

Здесь на помощь оптику – конструктору приходят современные программы расчёта оптических систем и вычислительная техника. Они позволяют, не приступая к процессу изготовления, установить, как изменится качество изображения, создаваемое новой оптической системой, если конструктивные элементы системы: радиусы кривизны поверхностей, толщины линз, воздушные промежутки, показатели преломления будут отличаться от исходных значений в пределах допусков, существующих в условиях современного производства. И если погрешности изготовления не влияют заметным образом на качество оптической системы или если они могут быть скомпенсированы незначительным изменением одного из воздушных промежутков, система может быть признана технологичной. Конечно, при этом необходимо, чтобы поверхности оптических деталей не были слишком крутыми, чтобы на одном блоке могли быть размещены несколько деталей, с учётом роста серийности. И одновременно с решением проблемы улучшения технологичности оптических систем необходимо решать и проблему автоматизации процесса изготовления и контроля новой оптики.

**ПРИМЕР 1.** На рис.2 приведены четыре варианта схемных решений ахроматических микрообъективов с линейным увеличением  $\beta = -40\times$  и длиной тубуса 160 мм, предназначенных для комплектования рабочих моделей биологических, металлографических и поляризационных микроскопов. Первые три объектива имеют числовую апертуру  $A = 0,65$ , апертура последнего объектива чуть меньше –  $A = 0,60$ .



*Рис.2. Четыре варианта схемных решений ахроматических микрообъективов с линейным увеличением  $\beta=-40\times$  и длиной тубуса 160 мм*

Напомним, что в соответствии с принятой классификацией линзовых объективов микроскопа по степени их коррекции [25], к ахроматическим объективам был отнесён тип систем, у которых ахроматизация выполнена для двух длин волн, а волновые aberrации для осевой точки предмета в спектральном интервале от  $C$  до  $F$  не превышают  $0,5\lambda$ . Вторичный спектр таких систем, обусловленный применением в них обычных сортов стёкол, составляет в области спектра от линии  $C$  до линии  $g$  для слабых объективов  $1\lambda$ , для высокоапертурных объективов – около  $2\lambda$ . Астигматизм и кривизна изображения не исправляются.

Как видно из рисунка, конструкции объективов значительно отличаются. Объясняется это постоянной работой по улучшению качества изображения, унификации оптических характеристик и повышению их технологичности. Этому способствует разработка новых оптических материалов с особым ходом частных относительных дисперсий, совершенствование методов расчёта. Лишь первый объектив – МЩ (рис.2,а) имеет недостаточную степень коррекции aberrаций, у остальных

же объективов коррекция aberrаций вполне удовлетворительная. Коррекционных возможностей в объективе МЩ (т.е. свободных конструктивных параметров) недостаточно и поэтому для уменьшения aberrаций (и, прежде всего хроматизма увеличения) схему необходимо модифицировать, например, введением в неё дополнительного двусклеенного оптического компонента. Новые значения конструктивных параметров модифицированной системы могут быть вычислены методом расчёта микрообъективов по частям [25]. Подробно последовательность проектирования микрообъектива  $40 \times 0,65$  рассмотрена в учебном пособии [26].

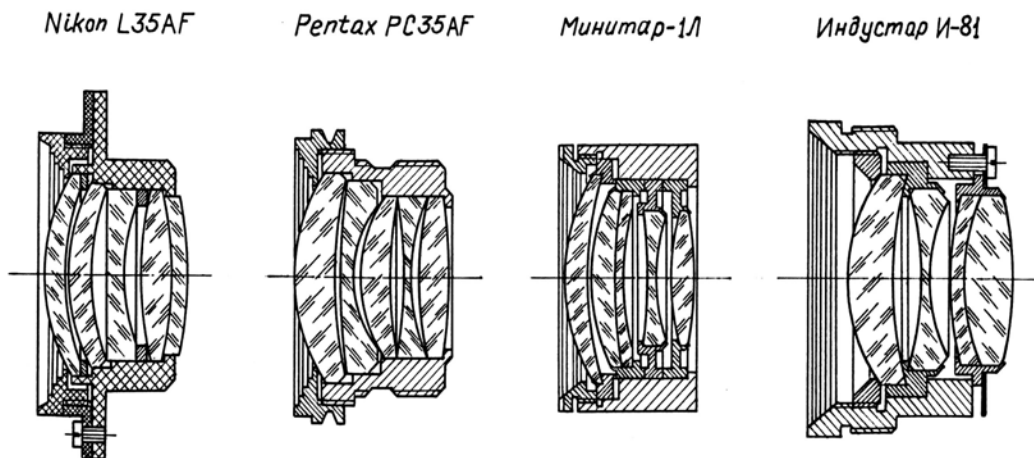
Новый ахроматический объектив ОХ-30 с улучшенной коррекцией вторичного спектра, имеющий аналогичную схему, представлен на рис.2,в. Введение дополнительного компонента, отделённого значительным воздушным промежутком, обусловило и большее значение высоты объектива (расстояния от предмета до опорного торца объектива) –  $H = 45$  мм, в отличие от других объективов на рис.2, имеющих высоту  $H = 33$  мм, являющуюся унифицированной характеристикой микроскопа.

В табл. 1 учебного пособия [26] приведены допуски на конструктивные параметры объектива  $40 \times 0,65$  с улучшенной коррекцией aberrаций (прототипа ОХ-30). Причём значения допусков определены исходя из допустимой величины ухудшения критерия качества изображения. В качестве последнего принято среднее квадратичное отклонение волновой aberrации, которое не должно превышать  $\lambda/14$ . Нетрудно убедиться в том, что эти допуски не превышают допусков, приемлемых для серийного производства [19]. Таким образом, если полагать, что все четыре схемы объективов характеризуются примерно одинаковой чувствительностью к технологическим погрешностям изготовления деталей и сборки, а также не содержат линз из трудоёмких в обработке материалов, то в качестве основных критериев оценки их технологичности следовало бы принять следующие: общее количество линз, количество двухлинзовых и трёхлинзовых склеенных компонентов. Вспомним, что технологическая операция склеивания является ручной операцией и характеризуется исключительной сложностью и ответственностью (в части обеспечения чистоты склеиваемого слоя, недопущения деформаций деталей, точности центрировки), а также большой трудоёмкостью. На склеиваемые поверхности линз назначаются более строгие допуски ( $N < 3-5$  полос), чем на поверхности, граничащие с воздухом. И если решается вопрос о комплектовании объективами школьных микроскопов, годовой объём выпуска которых планируется довести до 120 тысяч штук, то, очевидно,

предпочтение следует отдать объективу О-40, разработанному в ИТМО (рис.2,г), как самому простому и технологичному в этой группе.

В заключение отметим ещё одно преимущество ахроматических объективов, помимо простоты оптической схемы. Эти объективы пока незаменимы для применения в поляризационных микроскопах, так как не содержат линз из оптических сред, обладающих заметным двойным лучепреломлением (как, например, флюорит).

**ПРИМЕР 2.** На рис.3 приведены конструкции короткофокусных светосильных объективов к малогабаритным фотоаппаратам со стандартным размером кадра на плёнке ( $24 \times 36$  мм). Объективы широкоугольные, имеют одинаковые относительные отверстия 1:2,8 и незначительно отличаются величиной фокусного расстояния. Если оценить качество отечественных объективов по разрешающей способности то, например, у объектива «Минитар» она составляет  $50 \text{ мм}^{-1}$  в центре поля и  $20 \text{ мм}^{-1}$  на краю. Объектив «Индустар 81» – самый простой по конструкции – имеет примерно такое же разрешение. Оба объектива могут быть отнесены к объективам среднего качества [27]. Качество объективов японских фирм несколько превосходит качество объектива «Минитар».



*Рис.3. Конструкции короткофокусных светосильных объективов к малогабаритным фотоаппаратам*

Все представленные объективы, кроме объектива «Индустар- 81», пятилинзовые. По типу конструкции они относятся к объективам насыпного типа, однако в отечественных образцах линзы установлены в оправках. Обращает на себя внимание тот принципиальный факт, что в объективе «Пентакс» отсутствуют не только оправы, являющиеся промежуточными

детальями между линзами и корпусом объектива, но и промежуточные кольца, с помощью которых «традиционно» обеспечивают заданные воздушные промежутки между компонентами. Вспомним, что установкой линз в оправы с последующей результативной обработкой баз – диаметра и торцев – достигаются следующие результаты:

1) за счёт увеличения диаметра оправы (по сравнению с диаметром самой линзы) и создания опорных торцев повышается точность базирования линз при установке в общий корпус насыпным методом (принцип ограничения поворотов и сдвигов);

2) при различающихся диаметрах линзовых компонентов диаметры всех оправ можно получить одинаковыми, что упрощает конструкцию корпуса и способствует повышению точности центрирования компонентов;

3) отпадает необходимость в промежуточных кольцах – их функция передаётся оправам;

4) закругляются до экономического уровня точности допуски на собственную центровку линз в оптическом цехе;

5) создаются условия для осуществления юстировки объектива путём взаимных разворотов и сдвигов компонентов на торцах оправ.

В этих, кажущихся очевидными, преимуществах насыпной конструкции (в оправках) заключены определённые противоречия. Они же вовсе выглядят сомнительными, если взглянуть на конструкции объективов «Никон» и «Пентакс».

Ещё при разработке оптических схем этих объективов, а речь идёт о создании объективов с форсированными оптическими характеристиками, в их конструкции были «заложены» свойства, обусловившие в конечном итоге не только высокие потребительские качества объективов, но и их технологичность. При этом разработчик объектива, несомненно, обладая знаниями, опытом и интуицией, имел в своём распоряжении современную ЭВМ и соответствующее программное обеспечение, располагал также исчерпывающими каталогами схем и оптических материалов, в том числе и с особыми свойствами, производственное освоение которых на предприятиях фирмы не вызывало принципиальных затруднений.

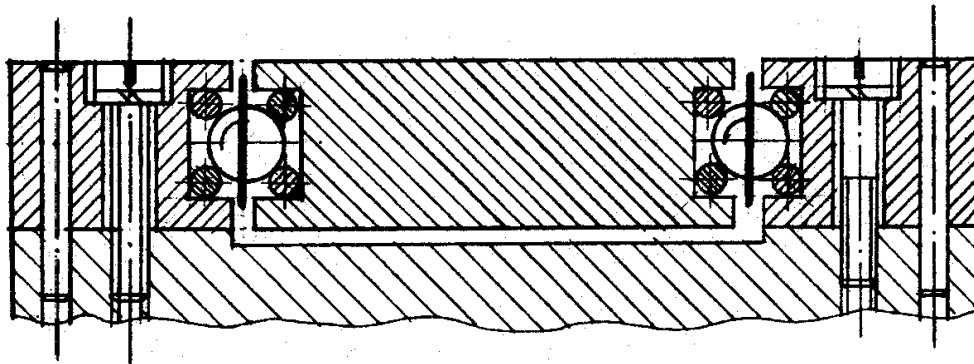
Высокий уровень техники и технологии облегчил задачу изготовления линз с заданными конструктивными параметрами и требуемыми по расчёту допусками на толщины, радиусы, центровку, отклонения диаметров и т.д. Это и обеспечило возможность осуществления сборки методом взаимозаменяемости, поскольку недопустимость компенсации технологических погрешностей была «запрограммирована» ещё при расчёте. Если бы полученные при расчёте требования и допуски не

могли быть реализованы на практике технологией крупносерийного производства (где применение ручной, непроизводительной юстировки исключено), поиск технологичной конструкции продолжился бы до положительного результата. То есть основная тяжесть работ по созданию объективов «Никон» и «Пентакс», предназначенных для изготовления крупной серией, пришлась как раз на самые ранние стадии – разработку схемы и конструкции, а также создание прецизионной технологии получения материалов с заданными свойствами и оборудования для изготовления линз.

Что же касается объектива «Минитар», то допуски на центрировку отдельных линз и на ряд воздушных промежутков оказались довольно жёсткими – 0,01 мм и даже 0,005 мм, то есть невыполнимыми при сегодняшнем уровне технологии и существующем оборудовании. Попытка ввести компенсационный поперечный сдвиг третьего компонента не имела успеха из-за слишком сильного влияния этого сдвига на приращение комы и астигматизма. Сдвиг последнего компонента вносит астигматизм на краю поля. Юстировка разворотом третьего и четвёртого компонентов оказалась малоэффективной. Заметим, что все эти методы не свойственны крупносерийному производству. Впоследствии объектив был пересчитан, а его конструкция изменена. Новый объектив получил название «Опалар». Это уже безоправная конструкция, в которую для обеспечения воздушных промежутков введены кольца. На наружные диаметры линз и колец установлены допустимые отклонения по пятому качеству (первому классу точности). На биение базирующих кромок колец заданы допуски в 0,0004 мм. К сожалению, судьба этого объектива неизвестна.

При производстве объективов «Индустар- 81» также не обошлось без юстировки. Последний компонент объектива крепится к корпусу с помощью упругой мембраны, позволяющей осуществлять юстировочные сдвиги этого компонента в пределах зазора между его оправой и корпусом.

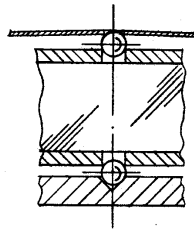
**ПРИМЕР 3.** На рис.4 представлена конструкция проволочных направляющих прямолинейного движения на шариках.



*Рис.4. Конструкция проволочных направляющих прямолинейного движения на шариках*

В отличие от известных призматических направляющих на шариках, для изготовления которых (в целях достижения точности) используют легированные инструментальные стали (ХВГ или 9ХС) либо же конструкционную углеродистую сталь (сталь 20) с цементацией и последующей закалкой рабочих поверхностей, в данной конструкции могут быть использованы различные, не столь дефицитные материалы, хорошо поддающиеся обработке (например, дюралюминий). Направляющие планки и каретку уже не нужно шлифовать. Износостойкость обеспечивается высокой твёрдостью материала калиброванной проволоки (серебрянки).

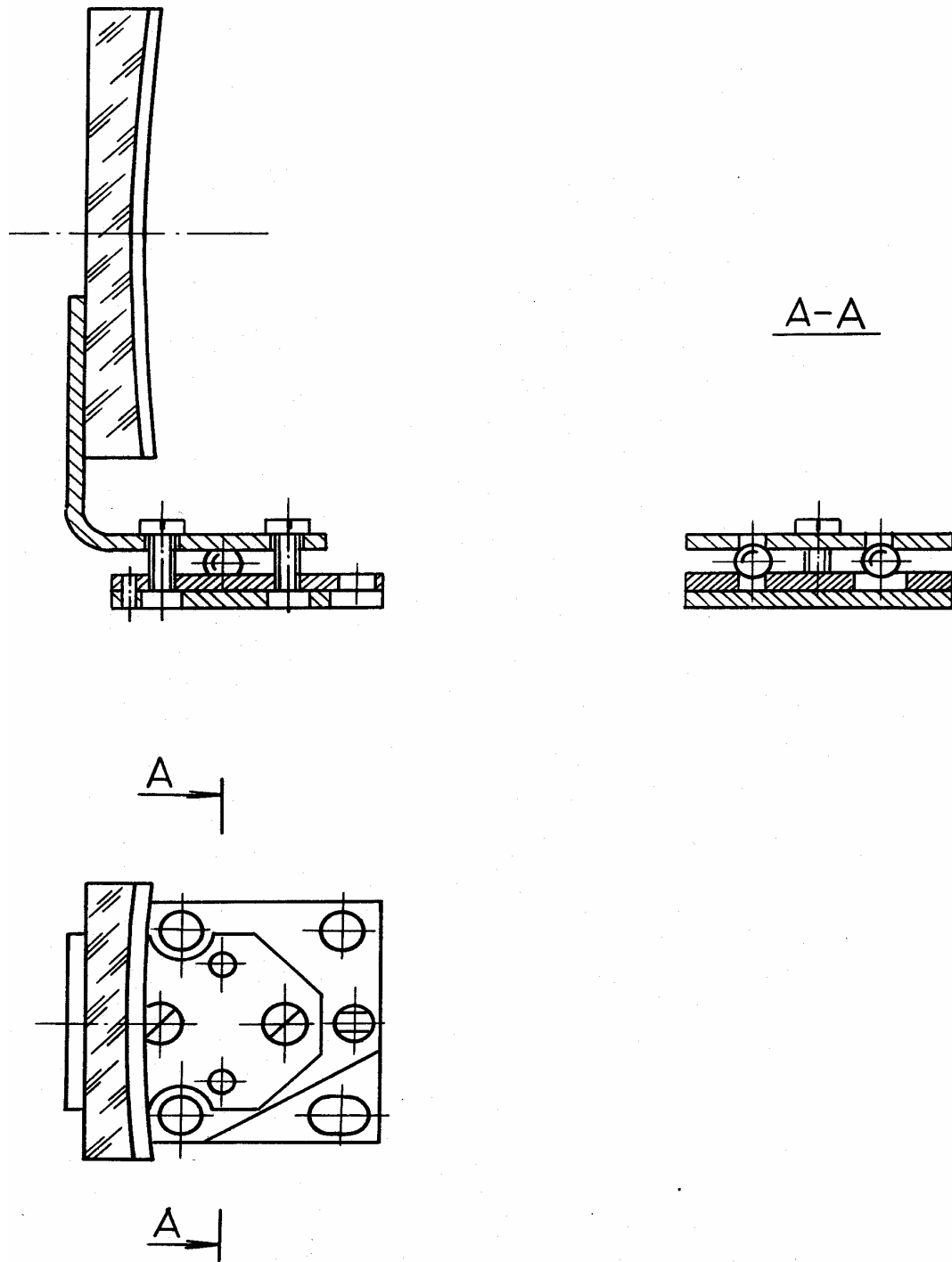
**ПРИМЕР 4.** В автономном малобазном фотодальномере «Блик» измерение дистанции до объекта съёмки производится путём решения параллактического треугольника. При этом погрешность измерения в значительной степени определяется зазором в шарнирах, обеспечивающих поворот барабанчика со шкалой и кулачком, а также полуотражающей пластины в оправе с рычагом, опирающимся на кулачок. Учитывая, что при серийном производстве изделия должны быть одновременно простыми, дешёвыми и надёжными, конструктор реализовал вариант безлюфтового шарнира, фрагмент конструкции которого представлен на рис. 5. Здесь ось поворота оправы с пластиной задаётся парой шариков, нижний из которых фиксируется лункой в основании корпуса, а верхний – отверстием плоской пружины, создающей силовое замыкание.



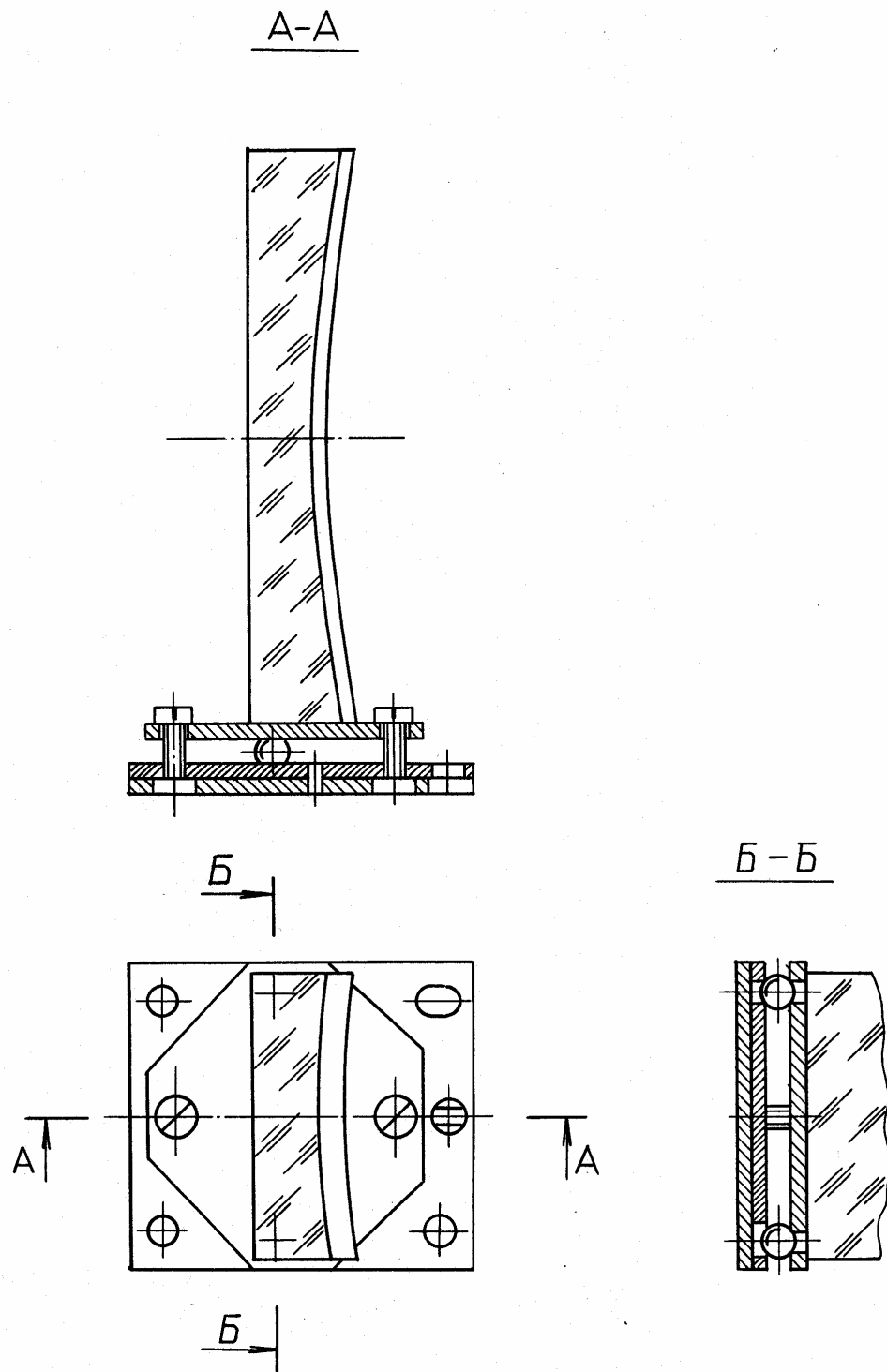
*Рис. 5. Фрагмент конструкции безлюфтового шарнира  
в фотодальномере «Блик»*

**ПРИМЕР 5.** На рисунках 6-8 представлены конструкции узлов зеркал спектральных приборов в регулируемых оправах. Основные детали этих конструкций получены из листового материала методом штамповки и гибки с использованием, при необходимости, сварки (рис.8). Благодаря такому решению удалось значительно снизить расход материалов и вес приборов, а, кроме того, уменьшить объём механической обработки. Зеркала здесь приклеены герметиком УТ-34. Конструкции позволяют производить наклон зеркала вокруг горизонтальной оси, разворот вокруг вертикальной оси (оси штифта) с помощью съёмного эксцентрикового поводка, а также сдвиг на базе вдоль нормали к поверхности зеркала в его вершине – от руки, либо так же, с помощью эксцентрикового поводка (рис.8).

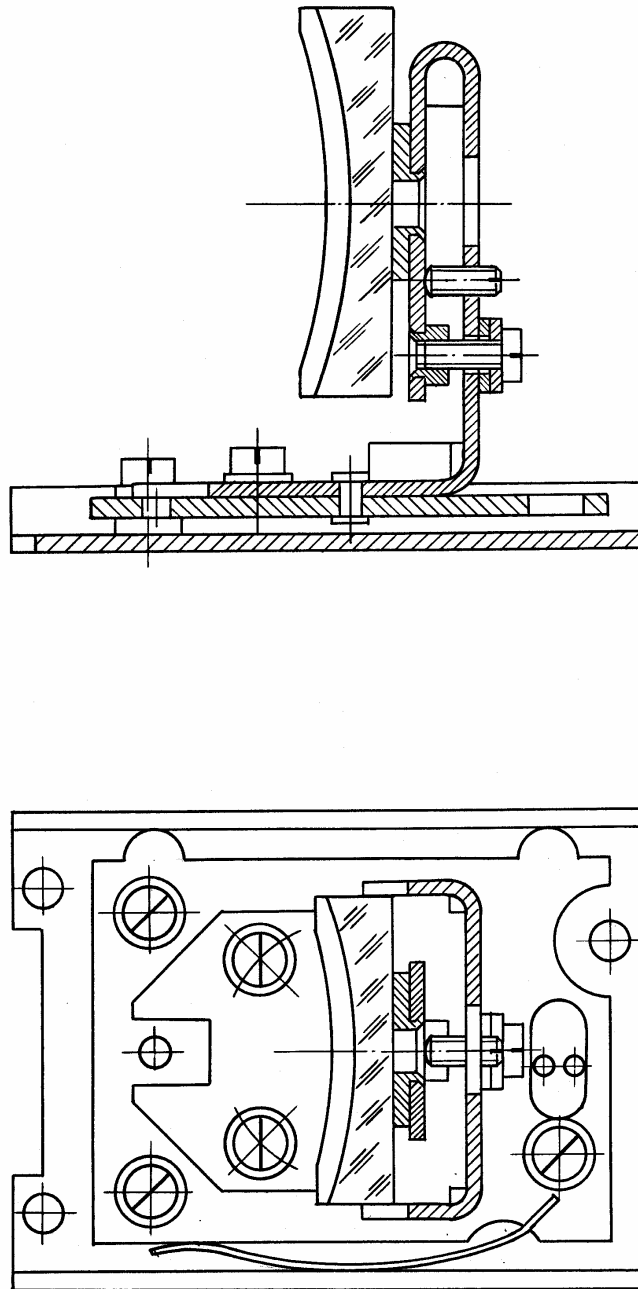




*Рис.6. Конструкция узла зеркала спектрального прибора в регулируемой оправе*



*Рис.7. Пара шариков и штифт в роли оси поворота реализуют две угловые подвижности юстируемого зеркала*



*Рис. 8. Конструкция узла эллиптического зеркала в регулируемой оправе*

**РАСЧЛЕНЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЯ  
НА СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ, ОБЕСПЕЧЕНИЕ УДОБСТВА СБОРКИ**

**ПРИМЕР 6.** На рисунках 9, а, б в условном виде представлены два варианта расчленения на узлы конструкции телескопической торцовой автоколлимационной трубки, широко используемой при юстировке

оптических приборов. Оптическая система такой трубки состоит из объектива, светоделительного кубика, двух сеток – основной и автоколлимационной, окуляра и конденсора. На основной сетке, расположенной перед окуляром, нанесено центральное перекрестие со штрихами шкалы (две скрещенные шкалы). Автоколлимационная сетка представляет собой прозрачное перекрестие на непрозрачном фоне.

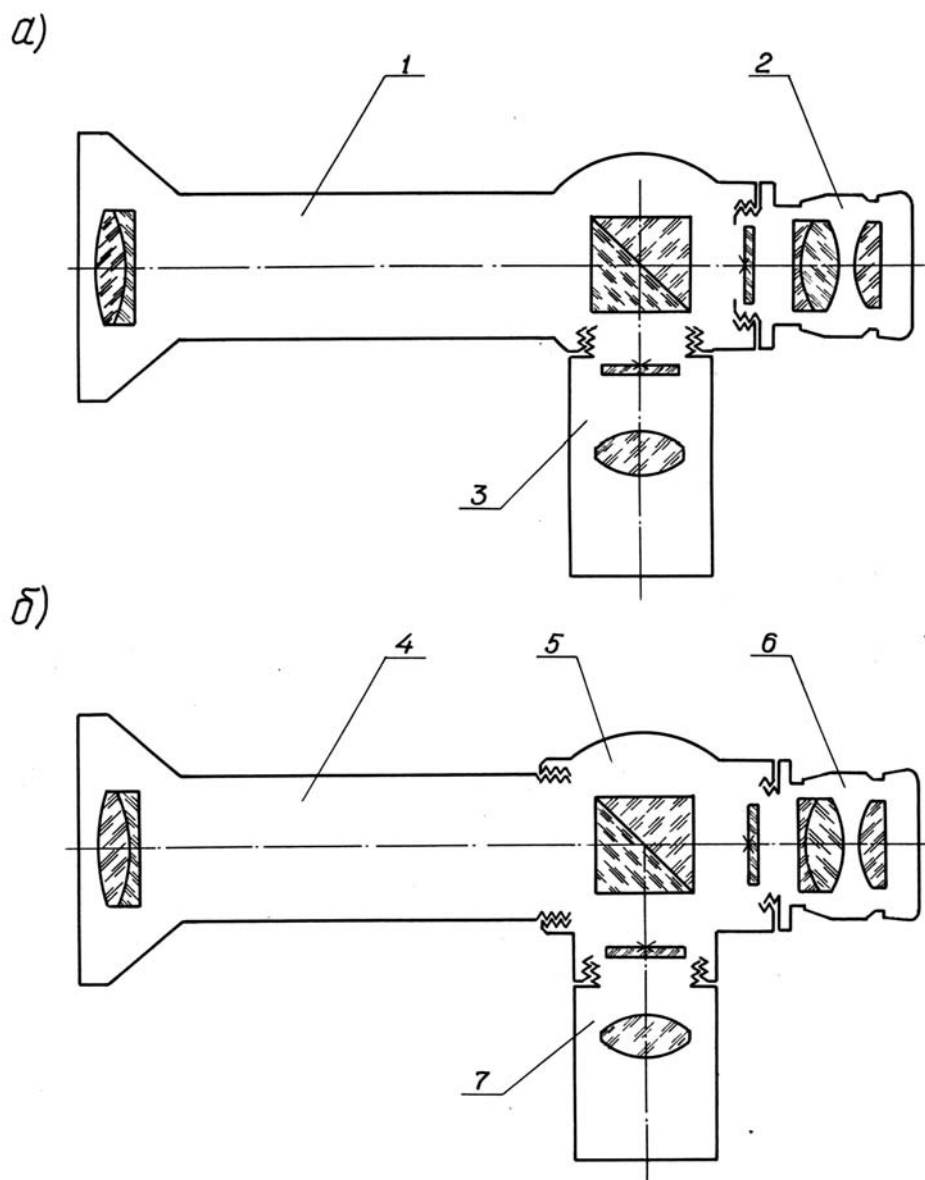


Рис. 9. Два варианта расчленения на узлы конструкции торцевой автоколлимационной трубки

В процессе сборки и юстировки самой трубки необходимо выполнить следующие технические требования.

1. Плоскости штрихов обеих сеток должны быть совмещены с фокальной плоскостью объектива с допустимой погрешностью в несколько сотых долей миллиметра (в зависимости от заданной точности и относительного отверстия объектива).

2. Центры перекрестий обеих сеток при наблюдении со стороны объектива должны быть совмещены. Допустимое отклонение 0,5 толщины штриха основной сетки.

3. Допустимый взаимный разворот штрихов обеих сеток – толщина штриха основной сетки на длине её радиуса. При этом вертикальный штрих перекрестия основной сетки должен быть направлен вдоль оси осветительного патрубку (содержащего конденсор). Допустимое угловое отклонение – 1 градус.

4. Визирная ось трубки должна быть перпендикулярна опорному торцу. Допустимое отклонение 0,25 интервала между соседними штрихами шкалы основной сетки.

Величины указанных допусков примерные.

В первом варианте (рис.9,а), которому соответствует изделие ПК-179, конструкция трубки расчленяется на три свинчиваемых между собой узла: корпус трубки с объективом и светоделительным кубиком (1), окуляр с основной сеткой (2) и конденсор с автоколлимационной сеткой (3). Разумеется, что каждый из указанных узлов в свою очередь может быть разбит на подузлы. Во втором варианте (рис. 9,б), который реализуется из элементов УСКЮ, конструкция трубки расчленяется на четыре свинчиваемых по резьбе узла: корпус трубки с объективом (4), светоделительный кубик с сетками (5), окуляр (6), и конденсор (7).

Какие же из семи перечисленных узлов двух конструкций одной и той же трубки являются функционально законченными и, следовательно, могут быть собраны и проконтролированы параллельно и независимо друг от друга? Напомним, что функционально законченный узел в процессе последующих этапов сборки не требует изменения взаимного расположения входящих в него деталей. Ранее уже отмечалось, что сборка отдельных узлов, благодаря их компактности и доступности мест регулирования, легче поддаётся механизации, оснащению средствами юстировки и контроля. Именно поэтому выгодно на этапе узловой сборки обеспечить выполнение наибольшей части технических требований, предъявляемых к изделию. Тогда общая сборка изделия оказывается чрезвычайно простой, а экономия совокупных затрат - значительной.

Анализ показывает, что первый вариант расчленения не даёт ни одного функционально законченного узла. Действительно, при окончательной юстировке трубки потребуются перемещать объектив (в узле 1) поперёк оптической оси для установления перпендикулярности визирной оси торцу; узлы же 2 и 3 придётся многократно развинчивать и свинчивать с корпусом, осуществляя требуемую установку основной сетки и сопряжение с ней сетки автоколлимационной по четырём степеням свободы. Приведём основные причины, по которым процесс регулирования сеток вызывает серьёзные затруднения, ещё более усугубляемые принятым расчленением изделия на узлы, хотя вызваны они недоработками реальной конструкции.

1. Доступ к сеткам для их регулирования по развороту в собранном изделии невозможен, из-за чего две фазы операции юстировки – регулирование и контроль – разъединены в пространстве и во времени, которое необходимо для повторной сборки. При этом разворот сеток, производимый в режиме запоминания исходного положения, кончиком деревянной палочки (конструкцией ПК-179 не предусмотрено устройство тонкого регулирования) осуществляется с дискретностью более грубой, чем допустимая погрешность.

2. При фиксации углового положения основной сетки относительно корпуса окуляра с помощью резьбового кольца из-за трения происходит «захват» и увлечение сетки кольцом, то есть нарушение произведённой регулировки.

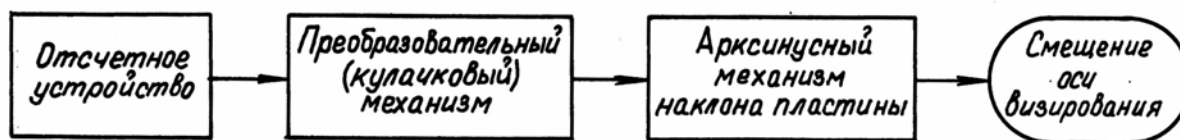
3. Поскольку соединение узлов в конструкции происходит путём их свинчивания, то угловое положение обеих сеток, установленных в присоединяемых к корпусу узлах, оказывается зависимым и в принципе не может быть отрегулировано в подборках. Более того, при повторном «захлёстывании» резьбового соединения первоначальная фиксация двух узлов по углу разворота не сохраняется из-за прирабатываемости торцов.

При заданных технических требованиях юстировка трубки под силу лишь высококвалифицированному оптику, обладающему достаточным арсеналом технологических приёмов, способному внести требуемые изменения в конструкцию, изготовить специальную оснастку и применить универсальные средства контроля.

При втором варианте расчленения изделия (рис. 9,б) сразу три узла – 5, 6 и 7 – оказываются функционально законченными. Для сопоставимости рассматриваемых вариантов будем полагать, что у окуляров 2 и 5 диоптрийная шкала отсутствует, хотя, как известно, её установка никогда не вызывает затруднений, а перемещения окуляра и конденсора вдоль оси являются скорее настроечными.

В процессе юстировки узла 5 выполняются второе и третье технические требования, и создаётся предпосылка к выполнению при окончательной юстировке первого требования. Открытый доступ к сеткам позволяет совместить во времени операции регулирования и контроля, а также, при необходимости, изготовить и применить регулировочное устройство. Компактность и «открытость» узла делают возможным и целесообразным применение простого и высокоточного метода контроля – с помощью визирного микроскопа с достаточно большим рабочим отрезком и апертурой объектива. Наилучшим образом этот метод может быть реализован с помощью таких серийных приборов как БМИ, УИМ, или ДИП. При втором варианте расчленения конструкции тот же вид соединения узлов (свинчивание) оказывается уже инвариантным для соединяемых узлов.

**ПРИМЕР 7.** В визирных измерительных трубах ППС-7 и ППС-11, устройство и технические характеристики которых приводятся в справочном пособии [28], применены две конструкции оптического микрометра с качающейся плоскопараллельной пластиной. Структурная схема механизма микрометра в этих конструкциях одна и та же и представлена на рис.10.



*Рис. 10. Структурная схема механизма оптического микрометра визирных труб ППС-7 и ППС-11*

Конструкция микрометра прибора ППС-7 (рис.11) выполнена в виде автономного устройства, закрепляемого на визирной трубе, в котором содержатся и неразрывно связаны между собой все элементы структурной схемы механизма: отсчётное устройство (шкала с нониусом), преобразовательное устройство (торцовый кулачок) и рычажный арксинусный механизм наклона с компенсатором длины плеча. Юстировку и контроль этого узла можно осуществить отдельно и независимо от визирной трубы, что и делается на универсальном измерительном микроскопе с помощью простого приспособления. Отметим, что узел микрометра имеет два положения фиксации на визирной трубе ППС-7, что позволяет производить измерения в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

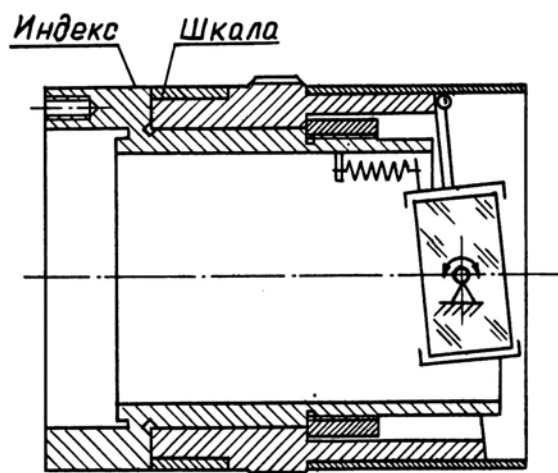


Рис. 11. Конструкция узла оптического микрометра прибора ППС-7

Кинематическая схема оптического микрометра визирной трубы ППС-11 приведена на рис. 12. Здесь плоскопараллельная пластина 1 помещена в шаровую оправу 2, которая установлена в цилиндрический шлифованный стакан 3 по ходовой посадке. В оправу 2 запрессованы три шарика-подпятника 4, образующие прямоугольный треугольник. Напротив подпятника, расположенного в вершине прямого угла, в стакане 3 закреплён неподвижный (регулируемый лишь при юстировке) упор 5. Напротив упора 5, в стакане 3 закреплён упор 6. Напротив упора 6, в стакане 3 закреплён упор 7. Напротив упора 7, в стакане 3 закреплён упор 8. Напротив упора 8, в стакане 3 закреплён упор 9. Напротив упора 9, в стакане 3 закреплён упор 10. Напротив упора 10, в стакане 3 закреплён упор 11.

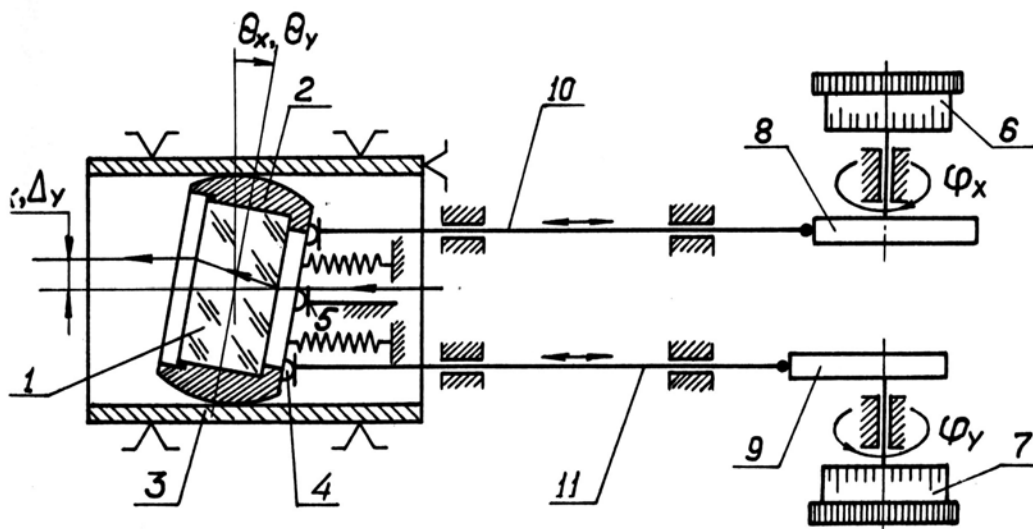


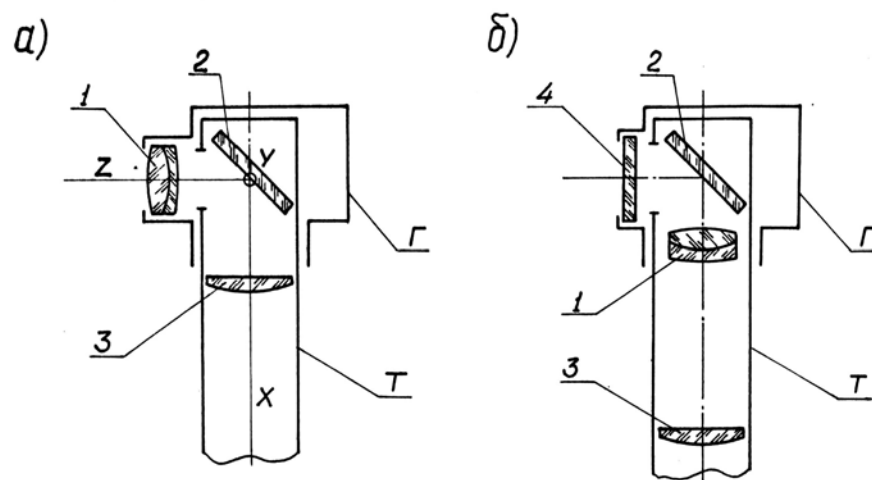
Рис. 12. Кинематическая схема оптического микрометра прибора ППС-11



Компоновка механизма микрометра осуществлена следующим образом. Узел качающейся пластины установлен перед объективом визирной трубы внутри стального цилиндрического корпуса, а маховички привода 6 и 7 с кулачками Архимеда 8 и 9, а также отсчётным устройством (шкала и индекс) – на шаровой головке внутреннего силуминового корпуса, вблизи окуляра, на удалении примерно 200 мм. Между кулачками 8 и 9 и подпятниками 4 помещены два толкателя 10 и 11 в виде стальных стержней с плоской и сферической пятаями. Две пары отверстий во внутреннем корпусе образуют опоры скольжения для толкателей. Как видно, собрать и проконтролировать механизм микрометра можно, лишь собрав конструкцию всей трубы, включая и элементы её оптической системы. Юстировка же микрометра требует частичной разборки трубы и повторной сборки. В этих условиях параллельная сборка невозможна.

Таким образом, различия в условиях базирования двух типов визирных труб, обусловленные различиями в их назначении [28], не позволили в конструкции ППС-11 скомпоновать механизм микрометра в виде функционально законченного узла, что и определило достаточно высокую трудоёмкость сборки этого изделия.

**ПРИМЕР 8.** На рис.13 представлены два варианта компоновки оптической схемы головной части визира перископического типа, от которого требуется (помимо прочего) достаточно хорошее качество изображения и воспроизводимость направлений визирования по азимуту в каждом из шести положений фиксации трубы Т относительно корпуса установки. Конструкция последнего здесь не рассматривается.



*Рис. 13. Два варианта компоновки оптической схемы головной части визира перископического типа*

В первом варианте (рис. 13,а) объектив 1 расположен в головке визира Г, выполненной в виде отдельного узла, закреплённого на цилиндрическом корпусе трубы Т. За объективом 1 следуют головное зеркало 2, коллектив 3 и далее линзы оборачивающей системы. Перед окончательной юстировкой всей установки, составной частью которой является визир, его труба Т без головки Г должна быть просунута сквозь обоймы направляющих шарикоподшипников в корпусе установки, после чего вновь головка устанавливается на трубу. Но повторная установка головки, в которой размещён объектив, потребует повторения юстировки изделия в части согласования направлений визирования основной системы и вспомогательной, служащей для фиксации визира по азимуту.

Поясним, что при данном виде соединения (типа вал – втулка с гарантированным зазором) добиться воспроизводимости фиксации двух узлов с требуемой точностью – несколько секунд угла  $\varphi_X$  и 5 мкм сдвига  $\Delta_Y$  – невозможно. Поэтому после надлежащей фиксации головки Г производят юстировку системы разворотом головного зеркала 2 вокруг оси X. С учётом полевых условий эксплуатации изделия, при которых головка визира может испытывать тряску и незначительные удары, становится сомнительной надёжность сохранения точности, достигнутой при юстировке.

Во втором варианте (рис. 13,б) объектив 1 расположен уже внутри трубы Т за головным зеркалом 2, а для предохранения системы от пыли и влаги в головке визира установлено защитное стекло 4. Теперь труба Т визира, в которой разместились все элементы оптической системы, может быть полностью и окончательно отъюстирована без головки Г и отдельно от установки, что значительно проще. Влияние клиновидности защитного стекла 4 можно либо ограничить соответствующим допуском, либо устранить разворотом детали. При этих условиях положение головки на трубе визира инвариантно к направлению визирования. Стальной корпус трубы предохраняет теперь объектив, как и другие узлы оптической системы, от взаимных смещений при эксплуатации, и одновременно облегчает его центрирование в оптической системе, что важно для обеспечения надлежащего качества изображения. При этом допуски на установку головного зеркала 2, оказавшегося в параллельном ходе лучей, значительно шире, чем в первом варианте.

**ПРИМЕР 9.** На рис.14, а, б показаны две конструкции ведущего вала 4.

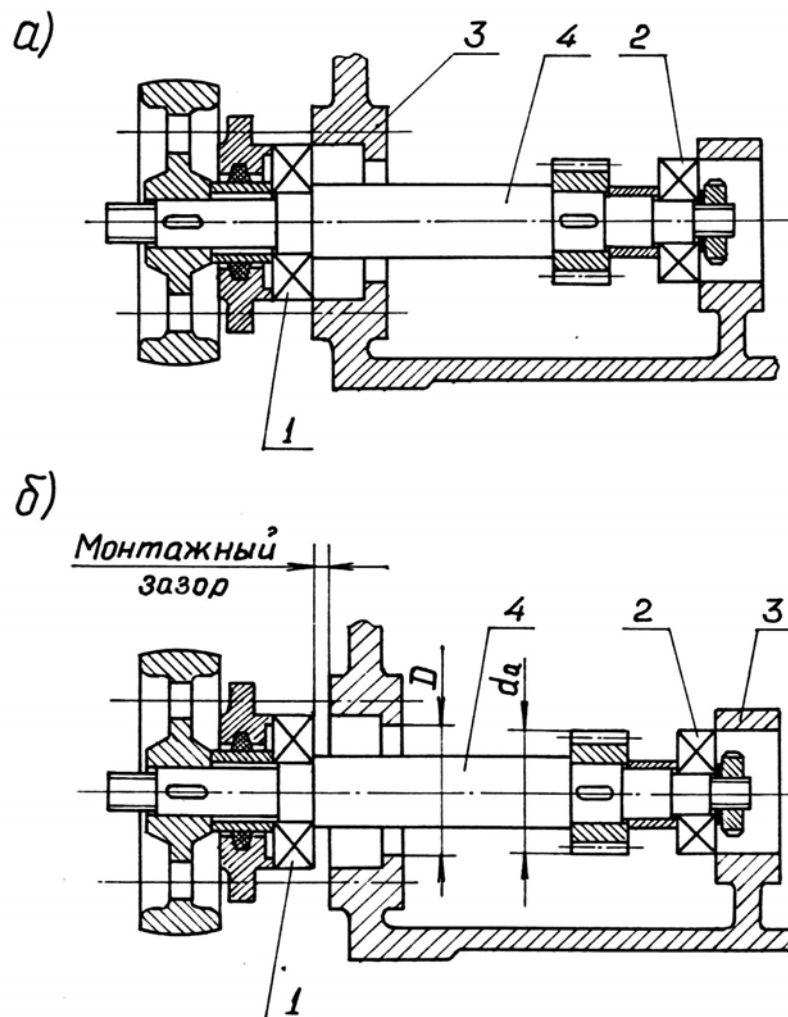


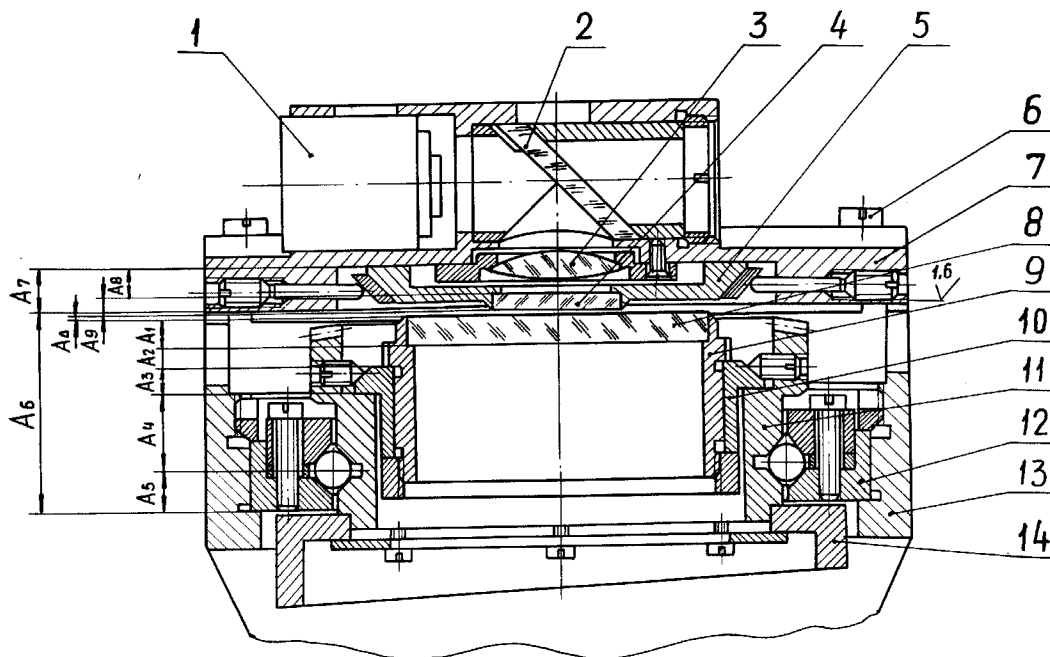
Рис. 14. Установка ведущего вала с подшипниками в расточки корпуса:  
 а - в случае нетехнологичной конструкции; б – в случае технологичной конструкции

При сборке недопустимо, если одновременно в расточки корпуса 3 входят оба шарикоподшипника 1 и 2. Для осуществления такой сборки потребовалась бы весьма строгая центрировка вала с подшипниками по отношению к оси расточек и, следовательно, значительная трата времени. Если же, предусмотрев монтажный зазор, обеспечить последовательное сопряжение подшипников со своими расточками (рис.14,б), то строгого центрирования вала уже не потребуется, что позволит избежать потери времени. Первая конструкция (рис.14,а) нерациональна ещё и потому, что диаметр вершин зубьев  $d_a$  зубчатого колеса больше диаметра  $D$  отверстия в корпусе, что потребует установки колеса на вал исключительно внутри

корпуса в процессе общей сборки. Вторая же конструкция, где  $D > d_a$ , позволяет объединить в одной СЕ вал с зубчатым колесом, крышкой, шкивом и подшипниками. Эту СЕ удобнее собрать и проконтролировать отдельно, а затем установить в расточки корпуса.

## ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗА РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ И КОМПЕНСАТОРОВ НЕЗАВИСИМОГО ДЕЙСТВИЯ

**ПРИМЕР 10.** На рис. 15 представлен фрагмент конструкции узла оптического микрометра вертикального длиномера ИЗВ-3.



*Рис.15. К анализу размерной цепи узла оптического микрометра вертикального длиномера ИЗВ-3*

Используется микрометр для точной оценки десятых, сотых и тысячных долей интервала миллиметровой шкалы, установленной в измерительной пиноли, и состоит из поворотной плоскопараллельной пластины, на рисунке не показанной. Оправа пластины имеет вид одноплечего рычага, сферический наконечник которого опирается на торцевую поверхность кулачка 14, выполненную по винтовой линии. С кулачком связан стеклянный лимб 8, на котором нанесено сто делений и который служит для отсчёта сотых и тысячных долей миллиметра. Лимб вместе с кулачком может вращаться в подшипнике насыпного типа, одна беговая дорожка которого принадлежит конической шестерне 11, а другая -

сборной обойме 12. Шестерня 11 приводится во вращение конической трибкой, связанной с маховичком микрометра (не показаны). Отсчёт десятых долей миллиметра производится по шкале 4 с одиннадцатью биштрихами. Сюда же, в плоскость шкалы 4 с увеличением  $5\times$  проектируется изображение миллиметровых делений основной шкалы. Далее объективом 1 (через коллектив 3 и зеркало 2) изображение миллиметрового интервала основной шкалы вместе со шкалой – нониусом 4 и участком шкалы лимба 8 проектируется на экран прибора с увеличением  $12\times$ .

Для того чтобы изображение шкалы и лимба на экране были достаточно резкими, необходимо величину зазора  $A_{\Delta}$  между ними ограничить следующей величиной

$$A_{\Delta} = \Delta z = 0,2 / \sigma_A^2 \text{ мкм} = 0,2 / (0,04)^2 \text{ мкм} = 125 \text{ мкм} \approx 0,13 \text{ мм},$$

где  $\sigma_A$  - передний апертурный угол проекционного объектива 1.

Конструктивно узел микрометра выполнен таким образом, что как раз между лимбом 8 и шкалой 4 проходит плоскость раздела узла на два подузла, т.е. на две промежуточные СЕ. Базовой деталью верхней СЕ является оправа 7, несущая шкалу, коллектив, зеркало и объектив. Базовой деталью нижней СЕ является корпус 13, несущий лимб 8. Оправа 7 базируется своей плоскостью на четыре платика корпуса 13 и крепится винтами 6. Таким образом, зазор  $A_{\Delta}$  между шкалой и лимбом является замыкающим звеном сборочной размерной цепи, образуемой соответствующими звеньями двух СЕ.

Поставим перед собой задачу проверочного расчёта данной размерной цепи, учитывая то обстоятельство, что конструктор поставил на чертеже знак обработки «1,6» на платике корпуса 13, тем самым принимая решение о применении метода пригонки для обеспечения заданной точности сборки, и вместе с тем ввёл в спецификацию чертежа четыре шайбы толщиной 1,5 мм. Уравнение интересующей нас размерной цепи имеет вид:

$$A_{\Delta} = (A_6 + A_7) - (A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_8 + A_9).$$

Определив по чертежам деталей и СЕ, входящих в узел, номинальные размеры и предельные отклонения всех составляющих звеньев, находим номинальный размер и предельные отклонения замыкающего звена:

$$A_{\Delta} = 0_{-0,65}^{+2,555} \text{ мм}.$$

Знак минус в этом выражении означает натяг, при котором зазор образуется уже не между шкалой и лимбом, а между платиками корпуса 13 и опорной плоскостью оправы 7. Нетрудно вычислить допуск замыкающего

звена  $T_{\Delta}$ , соответствующий расчёту этой размерной цепи на максимум – минимум:

$$T_{\Delta} = 3,205 \text{ мм.}$$

Однако более точным и научно обоснованным способом расчёта подобной размерной цепи является вероятностный способ. Применяв его, получим уточнённые значения предельных отклонений и допуска замыкающего звена:

$$A_{\Delta} = 0^{+1,70}_{+0,20} \text{ мм,} \quad T_{\Delta} = 1,5 \text{ мм.}$$

Итак, для обеспечения требуемого по расчёту зазора (не более 0,13 мм) между шкалой и лимбом микрометра, конструктором предлагается пригонка – снятие слоя металла с платиков корпуса путём шабрения. В предельном случае толщина снимаемого слоя материала может составить 1,57 мм с каждого платика. Понятно, что при ручном способе пригонки ни высокой производительности, ни качества здесь не достигнуть. Кроме того, чтобы не повредить лимб и предохранить подшипник от попадания стружки, необходимо или тщательно экранировать их или же на время обработки сборный подшипник с шестернёй 11 и лимбом вовсе удалить из корпуса. Где же выход из этого затруднительного положения?

Проверка обоснованности выбранного конструктором метода достижения точности замыкающего звена показывает, что если на зазор между шкалой и лимбом установить допуск  $T'_{\Delta} = 0,06$  мм, то есть:

$$A'_{\Delta} = 0^{+0,13}_{+0,07} \text{ мм,}$$

то при числе составляющих звеньев  $i = 9$  и  $A_{\text{ср}} \approx 6$  мм взаимозаменяемость (причём неполная) могла бы быть обеспечена при выполнении каждого составляющего звена лишь по седьмому качеству. А если учесть, что большинство размеров составляющих звеньев представляет собой алгебраическую сумму двух-трёх составляющих размеров деталей, становится очевидным неизбежность применения метода компенсации – регулировки или пригонки.

Регулирование зазора можно было бы осуществить с помощью резьбового сопряжения оправы 9 лимба и промежуточной втулки 10. Однако это привело бы к увеличению торцевого биения лимба, что опасно при малой величине зазора. Поэтому единственно верным решением здесь остаётся применение метода пригонки, что, впрочем, и предусмотрел конструктор, но с включением в размерную цепь компенсирующего звена в виде шайб или прокладок. Недопустимо для этой цели использовать корпусную (сложную и дорогую) деталь.

Проведённый анализ позволил внести следующие изменения в эту размерную цепь. Во-первых, с введением звена-компенсатора в виде четырёх шайб под платику корпуса 13 толщиной  $1,6h12$ , то есть:

$$A_k = A_{10} = 1,6_{-0,1}^0 \text{ мм,}$$

потребовалось уменьшить номинальный размер звена  $A_6$  на 1,5 мм. Во-вторых, для уменьшения допуска замыкающего звена оказалось целесообразным ограничить допуски на звенья  $A_3$  и  $A_6$  размерной цепи двенадцатым квалитетом. В результате новое значение допуска замыкающего звена составило  $T_{\Delta} = 1,04$  мм.

В чём сущность и преимущества предложенной технологии обеспечения требуемого зазора между поворотным лимбом и неподвижной шкалой в оптическом микрометре? Для определения требуемой толщины шайб на одном из этапов сборки соединяют оправу 7 с установленной в ней шкалой 4 с нижней подборкой, проложив между ними четыре «технологические» шайбы известной толщины  $S_T$  (например,  $S_T = 1,50$  мм). Далее с помощью фокусировочного механизма визирного микроскопа прибора УИМ-23 (ДИП-6) измеряют величину воздушного промежутка  $d_{и}$  между лимбом и шкалой. Визирование микроскопа осуществляют со стороны оправы 7 через отверстие, при этом зеркало 2 ещё не установлено. Вычисляют требуемую толщину шайб по формуле:

$$S = (S_T + d_{ср} - d_{и}) \pm 0,03 \text{ мм,}$$

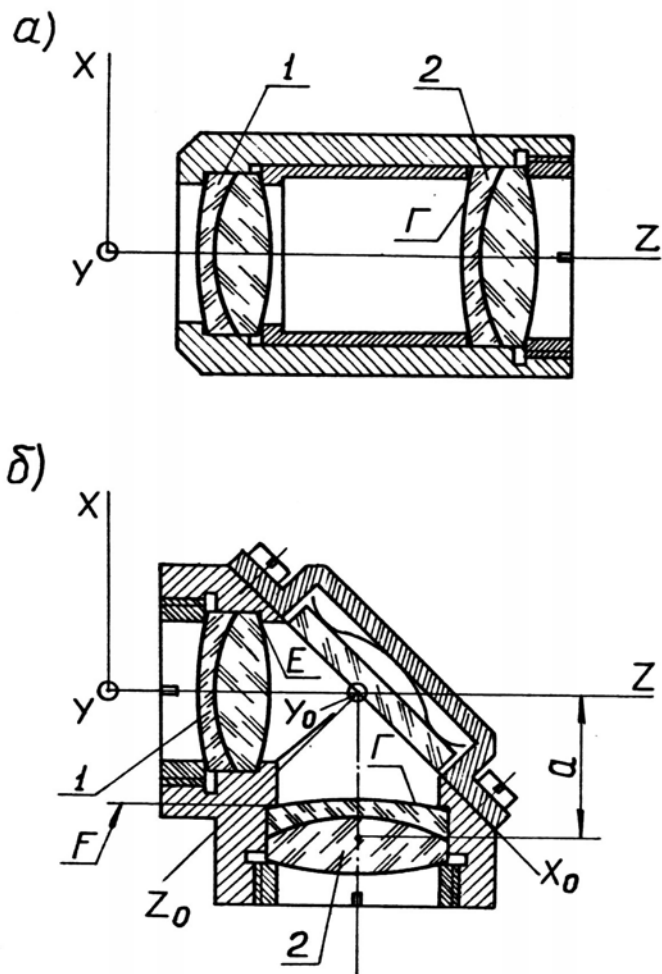
где  $d_{ср} = 0,10$  мм – среднее значение величины воздушного промежутка при выбранном допуске.

Затем разъединяют подборки и осуществляют установку и юстировку в оправе 7 зеркала 2. После изготовления (или подбора из имеющегося на рабочем месте комплекта) шайб необходимой толщины производят окончательную сборку узла.

Таким образом, если сравнивать с исходной технологией, здесь удалось, во-первых, существенно уменьшить вероятность повреждения оптических деталей при сборке, во-вторых, повысить точность контроля величины воздушного промежутка и, в-третьих, исключить ручную пригонку (шабрение), т.е. значительно повысить производительность и качество сборки.

**ПРИМЕР 11.** На рис. 16 изображены два варианта компоновки одного и того же микрообъектива МО-22  $5 \times 0,15$ ;  $f_{об}' \approx 25$  мм, состоящего из двух склеенных линз. Первый вариант компоновки (рис.16,а) нашёл применение в измерительных приборах (длиномерах, компараторах, универсальных измерительных микроскопах УИМ-21, УИМ-23); а второй

вариант (рис. 16,б) – в навесной аппаратуре к телескопам АЗТ-11, АЗТ-12 (фотогид, окуляр-микрометр).



*Рис. 16. Два варианта конструктивной компоновки микрообъектива МО-22*

Совершенно очевидно, что в первом варианте конструкции легче обеспечить центрирование компонентов микрообъектива, что необходимо для получения надлежащего качества изображения, а, следовательно, и требуемой точности измерений. Второй же вариант облегчает решение задачи компоновки оптической отсчётной системы в упомянутых выше приборах.

И всё же, попытаемся дать количественную оценку размерной цепи, определяющей центрирование оптической системы микрообъектива в том и другом случаях. В качестве замыкающего звена этой цепи примем



децентрировку компонента 2 по отношению к компоненту 1, рассматривая склейку как одиночную линзу. То есть, для упрощения расчётов и самого анализа в качестве оптической базы примем не центры кривизны сферических поверхностей, а оптические оси компонентов. В этом случае взаимную децентрировку компонентов можно характеризовать четырьмя составляющими:  $\varphi_X$ ,  $\varphi_Y$ ,  $\Delta_X$ ,  $\Delta_Y$  - в соответствии с системой координатных осей  $XYZ$  (см. рис. 16). Причём,  $\varphi_X$  и  $\varphi_Y$  - взаимные наклоны оптических осей, а  $\Delta_X$  и  $\Delta_Y$  - проекции на соответствующие координатные оси расстояния эквивалентной узловой точки компонента 2 до оптической оси компонента 1.

Для первого варианта компоновки объектива можно написать:

$$\begin{aligned}\varphi_X &= \frac{\Delta t_X}{D_{Л2}} + \frac{(\Delta_3)_Y}{\sqrt{4R_\Gamma^2 - D_{Л2}^2}} ; \\ \varphi_Y &= \frac{\Delta t_Y}{D_{Л2}} + \frac{(\Delta_3)_X}{\sqrt{4R_\Gamma^2 - D_{Л2}^2}} ; \\ \Delta_X &= 0,5(\Delta_3)_X + (C_{Л2})_X ; \\ \Delta_Y &= 0,5(\Delta_3)_Y + (C_{Л2})_Y .\end{aligned}$$

Здесь  $\Delta t$  – непараллельность торцев промежуточного кольца в миллиметрах;  $D_{Л2}$  - диаметр линзы 2;  $\Delta_3$  - зазор между линзой 2 и корпусом;  $R_\Gamma$  – радиус поверхности  $\Gamma$  линзы 2;  $C_{Л2}$  - собственная децентрировка линзы 2; индексы «X» и «Y» означают проекции рассматриваемых отклонений на соответствующие координатные оси. Предполагается, что обе расточки (под линзы 1 и 2) и подрезка опорного торца производятся с одной установки.

При втором варианте компоновки объектива выражения для тех же составляющих децентрировки примут уже иной вид:

$$\begin{aligned}\varphi_X &= \frac{(\Delta_3)_Y}{\sqrt{4R_\Gamma^2 - D_{Л2}^2}} + \delta_\pi + 2\varphi_{X0} \cos \varepsilon_0 ; \\ \varphi_Y &= \frac{(\Delta_3)_Z}{\sqrt{4R_\Gamma^2 - D_{Л2}^2}} + \delta_\varphi + 2\varphi_{Y0} ; \\ \Delta_X &= 0,5(\Delta_3)_Z + (C_{Л2})_Z + 2\Delta_{z0} \cdot \sin \varepsilon_0 + 2a\varphi_{Y0} ; \\ \Delta_Y &= 0,5(\Delta_3)_Y + (C_{Л2})_Y + \Delta_x + 2a\varphi_{X0} \cos \varepsilon_0 .\end{aligned}$$

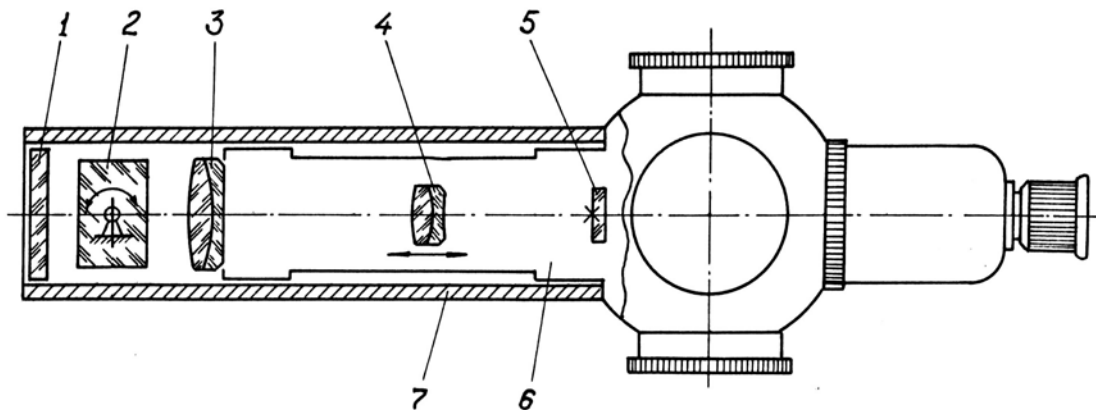
Здесь  $\varepsilon_0$  - угол падения осевого луча на зеркало;  $a$  – расстояние по оси от зеркала до эквивалентной узловой точки компонента 2;  $\varphi_{X0}$ ,  $\varphi_{Y0}$  и  $\Delta_{z0}$  - погрешности базирования плоского зеркала;  $\delta_\pi$  - разность отклонений от

перпендикулярности опорных торцев  $E$  и  $F$  к технологической базе ( $XOZ$ );  $\delta\varphi$  - неперпендикулярность торцев  $E$  и  $F$  в главном сечении;  $\Delta_x$  - непересечение осей расточек.

Сравнение и анализ приведённых здесь выражений показывают, что обеспечить приемлемую точность взаимной центрировки компонентов (при втором варианте конструкции) невозможно без пригонки, при условии ограничения допуска на непересечение осей расточек. Более того, сложной проблемой, учитывая малые размеры, остаётся обеспечение сборки средствами контроля.

**ПРИМЕР 12.** Наибольшую сложность при сборке ОП вызывает компенсация технологических погрешностей в случае многопараметрической юстировки (например, устранение комы децентрировки, астигматизма и сферической аберрации в микрообъективе). Здесь значение компенсаторов независимого действия – неопределимо, в особенности, когда таковые удаётся отыскать среди схемных элементов. Наглядный тому пример – усовершенствование методики юстировки прецизионной визирной трубы для контроля прямолинейности, плоскостности и соосности ППС-11 [29].

На рис. 17 в схематичном виде представлена конструкция визирной системы этой трубы без линз оборачивающей системы и окуляра.



*Рис. 17. Конструкция визирной системы трубы ППС-11*

В соответствии с техническими условиями изготовления и приёмки прибора ППС-11 визирная линия трубы должна быть [28]:

- 1) строго прямолинейной (допустимая погрешность прибора  $\pm (0,02 + 5 \cdot 10^{-3} L)$  мм, где  $L$  – расстояние до объекта визирования в метрах);

2) параллельной образующей наружного цилиндрического корпуса (допустимое отклонение 2 угловые секунды);

3) совмещённой с геометрической осью цилиндрического корпуса (допустимое отклонение 0,005 мм).

Следует обратить внимание на логику такой дифференциации и порядка следования технических требований, касающихся визирной линии, без чего не может быть и речи о высокой точности прибора. Это и своего рода подсказка к тому, как обеспечить выполнение и контроль этих требований. Вполне очевидно, что выполнение (как и контроль) очередного требования невозможно без обеспечения предыдущего.

На что же опиралась первоначальная «стратегия и тактика сборочной технологии»? Тезисно суть их заключалась в следующем. Высокая, достижимая лишь на производственном уровне, точность изготовления основных базовых деталей конструкции - наружной стальной трубы 7 (прежде всего в отношении цилиндричности и соосности поверхностей), внутреннего корпуса 6 трубы, отлитого из силумина, и призматической направляющей фокусирующей линзы 4. При этом пояски внутреннего корпуса притачивались по диаметру отверстия наружной трубы, а сопрягаемые поверхности направляющей и ползуна-оправы пригонялись путём доводки до «прилипания». Строгие допуски ( $\theta_{кл} = 2$  угловые секунды) на клиновидность пластины 2 микрометра и марки 1. Далее относительно поясков внутреннего корпуса 6, как от базы, производилась центрировка призматических направляющих с фокусирующей линзой, объектива 3 и перекрестия сетки 5, поскольку доступ к элементам регулировки при «одетой» наружной трубе был невозможен. В процессе центрировки вращение корпуса осуществлялось на точной призме, а контроль вёлся с помощью микроскопа. При этом устранялось биение наблюдаемого в микроскоп изображения перекрестия коллиматора, установленного на общем с призмой жёстком массивном основании. Регулировка шаровых опор направляющей производилась при двух крайних положениях фокусирующей линзы. По завершении юстировки на внутренний корпус одевалась наружная труба. Пластины оптического микрометра автоколлимационным методом приводили в положение, параллельное наружному торцу стальной трубы (строго перпендикулярному её геометрической оси) или же перпендикулярное визирной оси при фокусировке на бесконечность, после чего на шкалах маховичков оптического микрометра устанавливались нулевые отсчёты.

Однако, несмотря на исключительную тщательность изготовления деталей и сборки, обеспечить одновременно выполнение всех трёх

перечисленных выше требований ТУ удавалось крайне редко. Почти всегда возникала необходимость в подъюстировке. Причины неудачи очевидны. Во-первых, это нарушение принципа единства баз: юстировка и последующий контроль велись от разных баз. Во-вторых, не была предусмотрена компенсация клиновидности марки и пластины микрометра. Но главная причина – ошибка в стратегии, в неверном выборе метода достижения требуемой точности. Ведь предпринятая центрировка оптических элементов – это не компенсация отклонения визирной линии от прямолинейности, параллельности и соосности. Эта центрировка лишь косвенно, с малой вероятностью могла гарантировать выполнение всех требований ТУ. При столь жёстких допусках и «большом вкладе» в контролируемые параметры первичных погрешностей без целевой компенсации регламентированных техническими условиями отклонений – не обойтись.

Итак, прежде всего, следовало разобраться, что представляет собой визирная линия, и при каких условиях достигается её прямолинейность. Ещё в 1949 году Г.В. Погаревым [30] было введено понятие «промежуточной визирной линии» как геометрического места изображений центра перекрестия сетки через фокусирующую линзу при её перемещении. Изображение этой промежуточной визирной линии объективом трубы и является визирной линией в пространстве предметов. Если промежуточная визирная линия представляет собой прямую линию, то и визирная линия в пространстве предметов будет прямой. В трубах с внутренней фокусировкой поперечный сдвиг сетки с траектории эквивалентной узловой точки передвижной фокусирующей линзы приводит не только к наклону визирной линии, но и к её искривлению даже при идеально прямолинейных направляющих. Следовательно, для выполнения требования прямолинейности визирной линии необходимо перекрестие сетки 5 совместить с траекторией эквивалентной узловой точки фокусирующей линзы 4 (см. рис. 17).

Способ юстировки прямолинейности визирной линии, разработанный применительно к трубе ППС-11, подробно описан в уже упоминавшейся работе [29]. Юстировку направления визирной линии по отношению к геометрической оси трубы 7 легко осуществить сдвигом объектива 3 перпендикулярно оптической оси, для чего следовало ввести технологические отверстия в наружной трубе, обеспечивающие в собранном приборе доступ к регулировочным элементам. И, наконец, совмещение визирной линии с геометрической осью трубы 7 можно осуществить

небольшими наклонами пластины микрометра 2, после чего на шкалах маховичков выставить нулевые отсчёты.

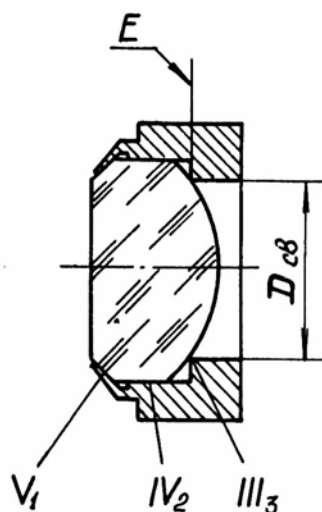
Разумеется, возложение функций компенсаторов на схемные элементы предполагает строгое обоснование диапазона компенсации, в пределах которого сохраняется свойство независимости их действия.

### **ПРИМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ НЕПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАР И МЕХАНИЗМОВ**

**ПРИМЕР 13.** Известно, что одной из наиболее ответственных операций на сборке объективов, требующих как высокого профессионализма, так и сосредоточенности, является завальцовка линз в оправы. Неопытному оптику в процессе завальцовки трудно избежать таких характерных дефектов, как пережатие линз или же их проворачивание и «стучание» в оправках. Поиски причин большого процента брака на этой операции заставили обратиться к структурному анализу данного соединения.

Если считать неподвижное соединение частным случаем замкнутой кинематической цепи, в которой интересующий элемент соединения (деталь) играет роль подвижного звена, а связи, с помощью которых осуществляется неподвижное соединение, - роль кинематических пар, то для анализа этого соединения с целью выявления в нём избыточных связей и местных подвижностей, а также определения причин их возникновения с успехом может быть применена методика структурного анализа, изложенная в учебном пособии [17]. При этом следует рассматривать одну точечную связь как кинематическую пару I класса, две – как пару II класса, и три – как пару III класса.

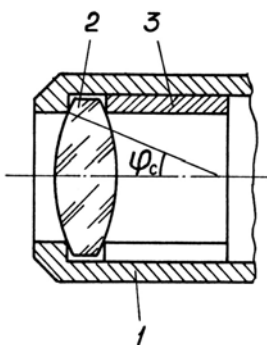
Как показано на рис. 18, сопряжение линзы с оправой, в случае её завальцовки, можно представить в виде совокупности трёх кинематических пар: тонкая кромка оправы, облегающая линзу по конической фаске, образует пару 5 класса ( $V_1$ ), цилиндрический поясok оправы образует пару 4 класса ( $IV_2$ ) и, наконец, острая кромка оправы, полученная пересечением плоскости «E» с расточкой  $D_{св}$ , образует со сферической поверхностью линзы пару 3 класса ( $III_3$ ).



*Рис. 18. Конструкция крепления линзы в оправе  
путём завальцовки*

Структурный анализ, который предлагается выполнить самостоятельно, показывает, что в этом соединении имеют место целых шесть избыточных связей, а это означает неизбежность объёмных деформаций линзы после завальцовки.

Фрагмент конструкции объектива, в которой линза закреплена без избыточных связей, приведён на рис. 19.

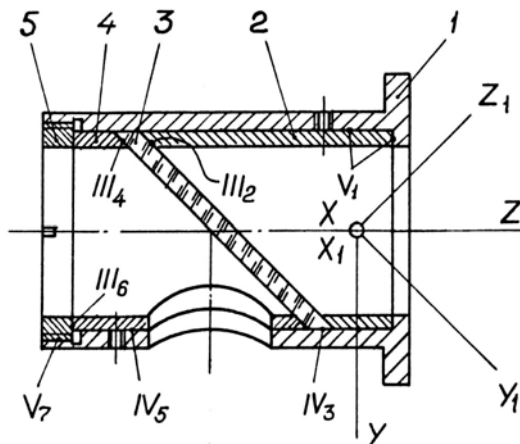


*Рис. 19. Крепление линзы в оправе  
с помощью пружинного кольца*

Здесь 3 – разрезное кольцо или же свёрнутая в кольцо пружинная лента. Условием самоцентрирования линзы в этой конструкции является

достаточная крутизна поверхностей линзы, определяемая углом  $\varphi_c$  нормали к поверхности в точке касания кромки с геометрической осью линзы.

**ПРИМЕР 14.** Конструкция крепления наклонного зеркала или светоделительной пластинки (пластинки Бека), показанная на рис. 20, часто приводится в литературе, посвящённой конструированию ОП.



*Рис. 20. Крепление в оправе наклонной светоделительной пластинки*

Так, в учебнике [31] эта конструкция рекомендуется для крепления неотчетливых зеркал, например, в осветительных системах, а в справочнике [13], хотя подобных рекомендаций и не дано, однако сказано, что «возможны деформации зеркала от неравномерного зажатия и температурных влияний. Качество крепления может быть улучшено при использовании пружинного кольца, которое должно быть установлено между резьбовым кольцом и прижимной втулкой».

Чтобы разрешить все сомнения относительно качества крепления зеркала, обратимся к структурному анализу этого соединения, приведённому в табл. 2.

Таблица 2.

Структурный анализ конструкции соединения светоделительной пластинки с оправой

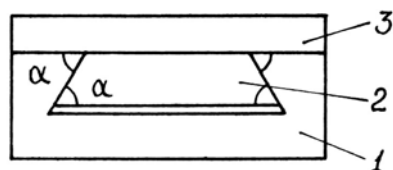
| Граф<br>соединения          | подвиж.<br>в<br>парах | Кинематические пары |                  |                 |                  |                 |                  | $\Sigma$ |   | f | q | W |                |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|----------|---|---|---|---|----------------|
|                             |                       | V <sub>1</sub>      | III <sub>2</sub> | IV <sub>3</sub> | III <sub>4</sub> | IV <sub>5</sub> | III <sub>6</sub> |          |   |   |   |   | V <sub>7</sub> |
| <p><math>K=7-4=3</math></p> | смещения              | $\Delta X$          |                  | 1               |                  | 1               |                  | 1        | 3 | 3 | 6 | 0 |                |
|                             |                       | $\Delta Y$          |                  | 1               |                  | 1               |                  | 1        | 3 |   |   |   |                |
|                             |                       | $\Delta Z$          |                  |                 | 1                |                 | 1                |          | 1 |   |   |   | 3              |
|                             | повороты              | $\varphi_x$         |                  |                 |                  |                 |                  |          |   | 0 | ⓪ |   |                |
|                             |                       | $\varphi_y$         |                  |                 |                  |                 |                  |          |   | 0 | ⓪ |   |                |
|                             |                       | $\varphi_z$         | 1                | 1               | 1                | 1               | 1                | 1        |   | 6 | ⓪ |   |                |

Анализ показывает, что наряду с наличием трёх местных подвижностей (при числе контуров в данном соединении  $K = 3$ ) – разворота вокруг оси  $Z$  втулок 2, 4 и зеркала 3, - которые легко устраняются стопорением втулок, в конструкции имеют место шесть избыточных связей ( $q=6$ ). Поэтому избежать деформации зеркала после даже лёгкого поджатия резьбового кольца 5 невозможно в принципе, как бы тщательно не пригонялись плоскости скосов у втулок 2 и 4. Специальная технология и сложная оснастка, применяемая при изготовлении втулок и зеркал с эллиптическим контуром, лишь увеличивают затраты труда, средств и времени. Если даже согласиться с неизбежностью деформации зеркала в данном соединении, то и тогда процесс юстировки – установление требуемого положения в корпусе 1 по углу разворота вокруг оси  $Z$  всех трёх деталей – представляется весьма нелёгким и не поддающимся нормированию.

Между тем подобная конструкция применяется в микроскопах (со сложными схемами) для крепления тонких, толщиной всего лишь 0,6 мм, светоделительных пластинок Бека [32]. Во избежание деформации пластинки между ней и втулкой устанавливается гарантированный зазор величиной 0,03- 0,05 мм. Кроме того, небольшие и тонкие пластинки и зеркала можно приклеивать к оправам консольно, не вызывая натяжений.

**ПРИМЕР 15.** Широкое применение, особенно в микроскопии, получили направляющие трения скольжения типа «ласточкин хвост» (рис.21).



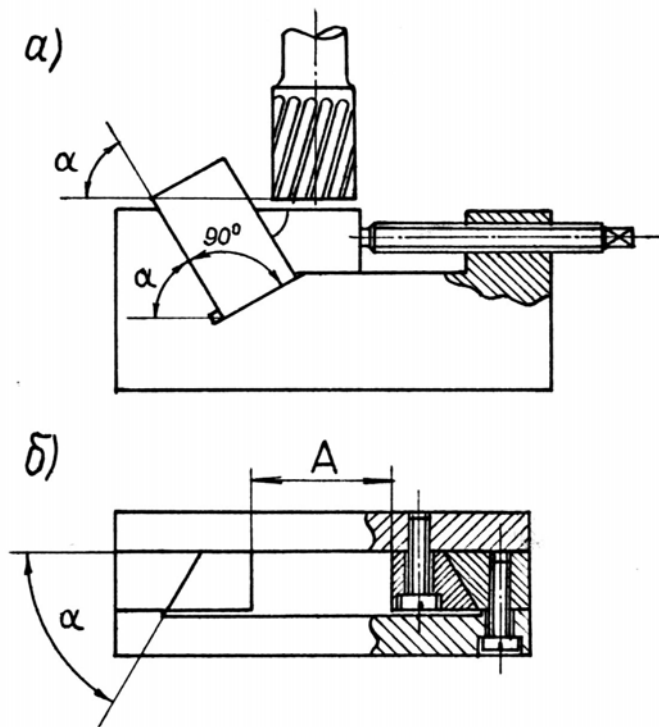


*Рис. 21. Направляющие трения скольжения  
типа «ласточкин хвост»*

Вместе с тем известно, что в этих направляющих имеют место четыре избыточные связи [13]. Этим объясняется значительная неплавность и нестабильность движения ползуна в конструкциях, выполненных на экономическом уровне точности. Добиться более или менее посредственных эксплуатационных характеристик можно двумя путями. Первый путь – тривиальный – ценой резкого повышения точности изготовления (по геометрическим параметрам) всех элементов направляющих, пригонки и доводки трущихся поверхностей в процессе сборки. Второй путь – с помощью специальной технологии.

Так, при изготовлении направляющих замкнутого типа (рис. 21) обработку деталей ведут на специальном трёхшпиндельном станке. Сначала резцами, установленными в двух шпиндельных головках, оси которых наклонены к вертикали на угол  $\alpha$  (в частности,  $\alpha = 60^\circ$ ), обрабатывают наклонные плоскости корпуса 1, а затем, после раздвижки шпинделей, – сопрягаемые плоскости вкладыша 2. В результате достигается строгая параллельность образующих этих плоскостей и равенство двугранных углов в сопрягаемых деталях. Наконец, после установки вкладыша в корпус и поджима его снизу для выборки зазоров, резцами вертикальной шпиндельной головки снимают верхний слой толщиной 0,1-0,2 мм у обеих деталей 1 и 2. Таким образом, создаётся плоскость, общая для трёх сопрягаемых деталей: корпуса 1, вкладыша 2 и планки 3. Зазоры в таких направляющих не превышают 3-5 мкм, а сами направляющие практически не требуют пригонки [32].

Заметного уменьшения отрицательного влияния избыточных связей на работу направляющих можно достичь также методом так называемой «взаимокомпенсирующей технологии». Этот метод предусматривает некоторую адаптацию к нему конструкции направляющих. Суть метода и соответствующая ему конструкция направляющих представлены на рис. 22.

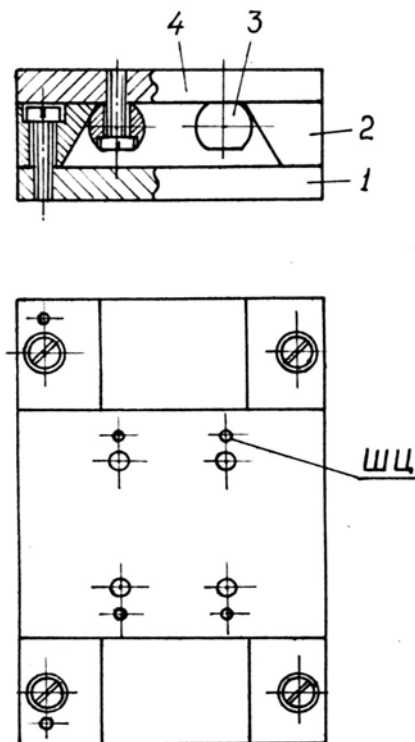


*Рис. 22. Изготовление направляющих планок методом «взаимокompенсующей технологии» и соответствующая этому методу конструкция направляющих*

При сборке внутренних планок между ними устанавливают параллельную мерную пластину или блок концевых мер размером  $A$ . Внешние планки при сборке поджимаются к внутренним с усилием, пропорциональным требуемой плотности хода каретки.

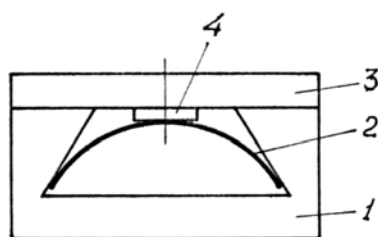
Кандидатом технических наук И.М. Долинским предложено несколько модернизированных вариантов конструкции направляющих типа «ласточкин хвост». На рис.23 изображена сборная конструкция направляющих, в которой внутренние планки заменены цилиндрическими валиками 3 из серебрянки, не требующими токарной обработки.

Число избыточных связей в этой конструкции направляющих уже две. Параллельность валиков при сборке с основанием 4 каретки обеспечивается также с помощью мерной пластины. Технология изготовления и сборки направляющих планок 2 аналогична той, что описана выше.



*Рис. 23. Модернизированная конструкция направляющих типа «ласточкин хвост» с гладкими валиками*

Оригинальная конструкция направляющих типа «ласточкин хвост», разработанная И.М. Долинским [33], представлена на рис. 24.



*Рис. 24. Оригинальная конструкция направляющих с упругим цилиндрическим жёлобом*

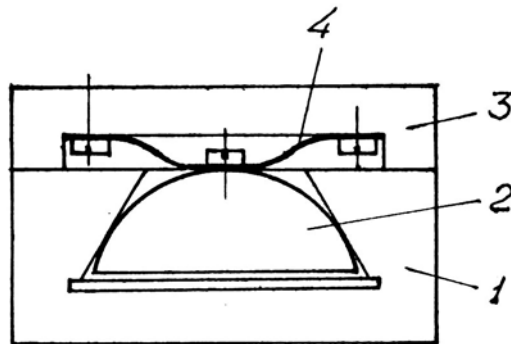
Главное её достоинство – полное отсутствие избыточных связей. Здесь вместо жёсткого трапецеидального вкладыша ползуна использован упругий цилиндрический, штампованный из листового материала (толщиной 0,3- 0,6 мм), жёлоб 2. Изменением толщины шайб 4 можно добиться желаемой плотности хода. Отсутствие избыточных связей предопределило ряд положительных свойств этой конструкции:

1. широкие допуски на изготовление всех элементов направляющих и полная их взаимозаменяемость, исключение операции доводки из техпроцесса сборки;

2. беззазорное соединение ползуна с направляющими благодаря постоянному замыканию сопрягаемых поверхностей силами упругости жёлоба и непрерывной автоматической компенсации износа трущихся поверхностей в течение всего времени эксплуатации;

3. высокая точность и плавность перемещения ползуна.

Другой вариант конструкции направляющих без избыточных связей представлен на рис. 25.



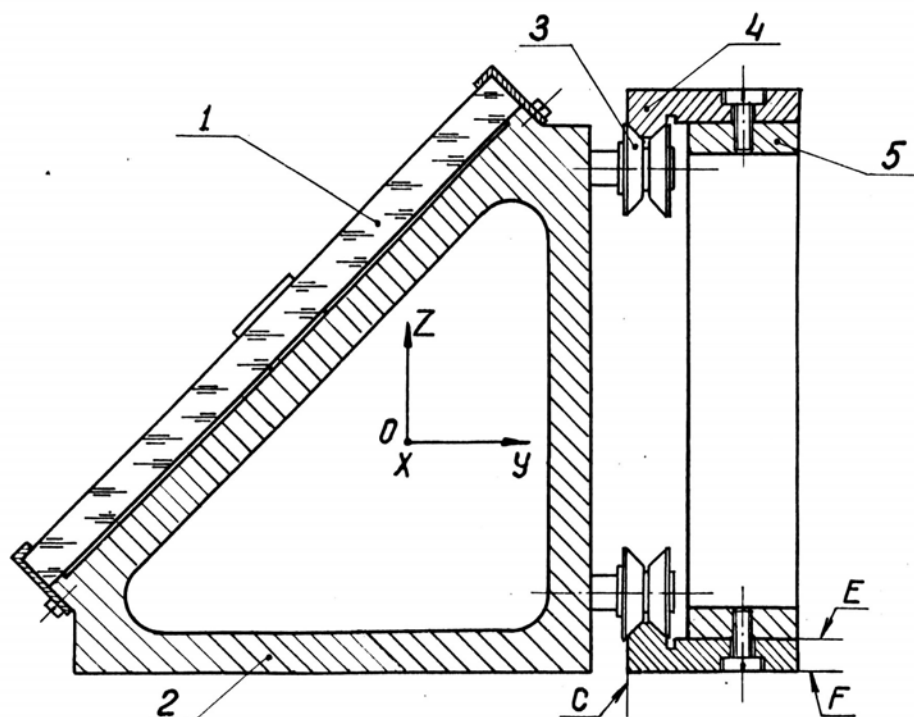
*Рис. 25. Конструкция направляющих с вкладышем ползуна в форме полуцилиндра*

Здесь вкладыш 2 ползуна выполнен в форме полуцилиндра, а силовое замыкание сопрягаемых поверхностей осуществляется с помощью плоской пружины 4.

**ПРИМЕР 16.** Известно, что достоинством направляющих с трением качения ( по сравнению с направляющими с трением скольжения) является значительно меньшее трение и возможность перемещения каретки при небольших величинах прилагаемых внешних сил [13]. Кроме того, они практически нечувствительны к колебаниям температуры, и поэтому их можно собирать без зазора и даже с небольшим натягом. Однако и в этих направляющих условием достижения хорошей плавности и точности перемещения каретки является отсутствие избыточных связей.

В оптическом телевизионном коммутаторе ОКЦ-1 переключение каналов производится введением в ход лучей соответствующих плоских зеркал, закреплённых на каретках, перемещающихся в вертикальном направлении по призматическим направляющим (рис. 26).

По техническим условиям допускаемое отклонение от прямолинейности движения каретки, а также воспроизводимость углового положения зеркала при многократном включении не должны превышать 30 угловых секунд.

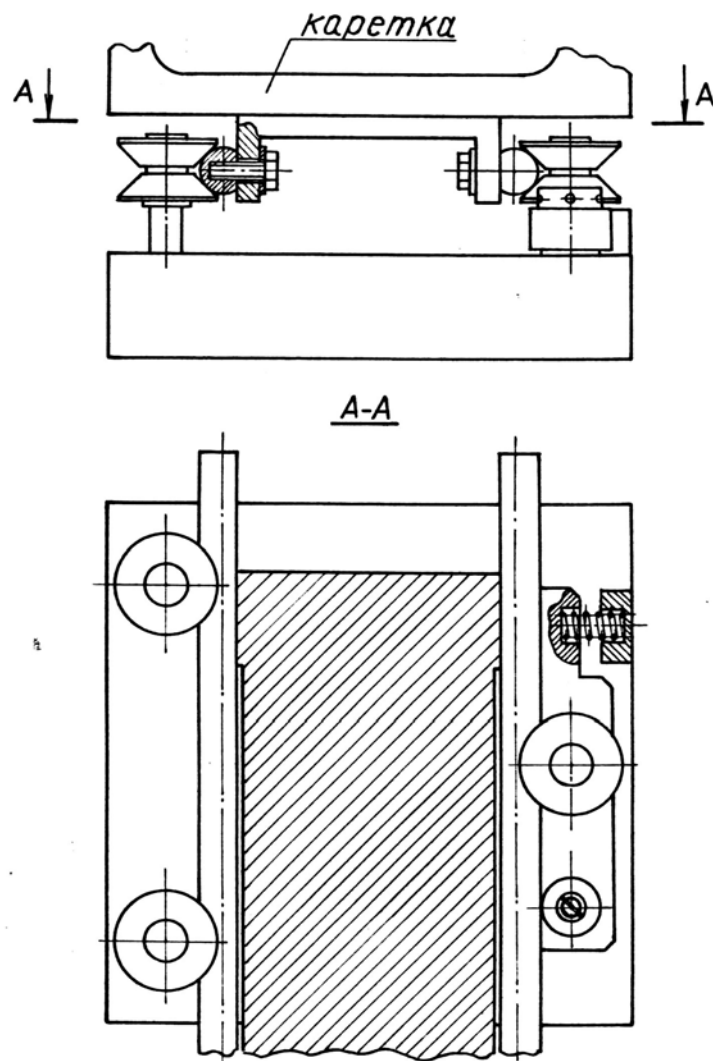


*Рис. 26. Призматические направляющие на роликах оптического коммутатора*

В конструкции (рис. 26) применены четыре ролика 3, оси которых жёстко закреплены на каретке 2. Причём, одна пара роликов имеет эксцентриковые оси для регулировки (устранения) зазора между роликами и направляющими. Сами призматические направляющие 4 крепятся к жёсткой прямоугольной формы раме 5. В процессе сборки направляющих для уменьшения величины биения роликов их рабочие поверхности обтачивались «как чисто» от оси вращения, задаваемой шарикоподшипниками (т.е. результативно). При этом режущие кромки резцов предварительно выставлялись по шаблону. Беговые дорожки, а также плоскость  $E$  в паре направляющих шлифовались от технологических баз  $F$  и  $C$ , а затем доводились. Таким образом обеспечивалась не только плоскостность базы  $E$ , прямолинейность и параллельность образующих рабочих поверхностей направляющих этой базе, но и заданная величина двугранного угла, а также его симметрия по отношению к базам  $F$  и  $E$ . Однако, несмотря на тщательное изготовление всех деталей этих

направляющих и не менее тщательную сборку, выполненную механиком высокой квалификации, достичь требуемой точности перемещения каретки не удалось. Впрочем, в этом – ничего удивительного, поскольку в конструкции целых одиннадцать избыточных связей.

В исправленной конструкции (рис. 27) вместо призматических направляющих применены цилиндрические, число роликов – три, причём один из них подпружинен.



*Рис. 27. Исправленная конструкция направляющих на роликах*

Кроме того применена инверсия – ролики установлены на неподвижном основании, а цилиндрические направляющие – на каретке.

**ПРИМЕР 17.** В подтверждение факта влияния избыточных связей на точность функционирования механизмов, их инструментальную

погрешность приведём случай, имевший место в заводской практике и описанный И.М. Долинским в учебном пособии [17].

Винтовой окулярный микрометр с отсчётом долей миллиметра в поле зрения окуляра должен обладать такой же точностью, как и обычный МОВ-1-16<sup>х</sup>. Поэтому изготовленные 50 винтовых микрометров направили в центральную измерительную лабораторию (ЦИЛ) на аттестацию. Аттестация показала, что ни один из них не удовлетворял требованиям ГОСТ 7865. Погрешность перемещения перекрестия сетки окуляра в пределах одного оборота винта составила от 7 до 12 мкм (при допуске 5 мкм), а в пределах восьми оборотов винта – от 15 до 20 мкм (при допуске 10 мкм).

Таблица 3  
К структурному анализу конструкций винтовых окулярных микрометров

| № поз. | Схема и структурные параметры механизма | Подвиж. в парах | № кинемат. пары |   |   |   |   |   |   | Σ | f | q | w |   |   |
|--------|---|-----------------|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|        |   |                 | 1               | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |   |   |   |   |   |   |
| 1      |   | смещения        | ΔX              |   | 1 | 1 | 1 |   |   | 3 |   |   |   |   |   |
|        |   |                 | ΔY              |   |   |   | 1 |   |   | 1 |   |   |   |   |   |
|        |   |                 | ΔZ              |   |   |   |   |   |   |   | 0 |   |   |   |   |
|        |   | повороты        | φ <sub>x</sub>  | 1 |   |   | 1 |   |   |   | 2 |   | 0 | 5 | 1 |
|        |   |                 | φ <sub>y</sub>  |   |   |   |   | 1 |   |   | 1 |   |   |   |   |
|        |   |                 | φ <sub>z</sub>  |   |   | 1 |   |   |   |   | 1 |   |   |   |   |
|        |   |                 |                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 2      |   | смещения        | ΔX              | 1 |   | 1 | 1 | 1 |   | 4 |   |   |   |   |   |
|        |   |                 | ΔY              |   |   | 1 | 1 |   | 1 |   | 3 |   |   |   |   |
|        |   |                 | ΔZ              |   |   | 1 |   |   |   |   | 1 |   |   |   |   |
|        |   | повороты        | φ <sub>x</sub>  | 1 |   | 1 | 1 |   | 1 |   | 4 |   | 0 | 1 | 1 |
|        |   |                 | φ <sub>y</sub>  |   |   | 1 | 1 |   |   | 1 | 3 |   |   |   |   |
|        |   |                 | φ <sub>z</sub>  |   |   | 1 | 1 |   | 1 |   | 3 |   |   |   |   |
|        |   |                 |                 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

Для выяснения причин возникновения таких погрешностей перемещения были измерены микрометрические винты всех 50 винтовых окулярных микрометров и проведён структурный анализ схемы механизма. Было установлено, что основной причиной таких погрешностей перемещения явились избыточные связи в механизме (табл. 3, поз.1), так как точность самих винтов оказалась достаточно высокой. Измерения показали, что предельная погрешность шага у всех 50 винтов была не более 2-3 мкм, а

накопленная на всей длине резьбы только у четырёх винтов оказалась равной 5 мкм, у остальных же она была в пределах погрешности шага.

Схема механизма была изменена таким образом, что вместо прежних пяти избыточных связей осталась лишь одна – в паре конических шестерён (табл. 3, поз. 2). Реализовать же на практике изменённую схему оказалось очень легко, поэтому после исправления всех окулярных микрометров они были подвергнуты повторной аттестации. Её результаты показали, что все 50 винтовых окулярных микрометров удовлетворяли требованиям ГОСТ 7865. Причём, у 42 микрометров погрешность перемещения перекрестия сетки окуляра оказалась меньше  $2/3$  установленного допуска, а у остальных – в пределах допуска.

## **АНАЛИЗ И ОТРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

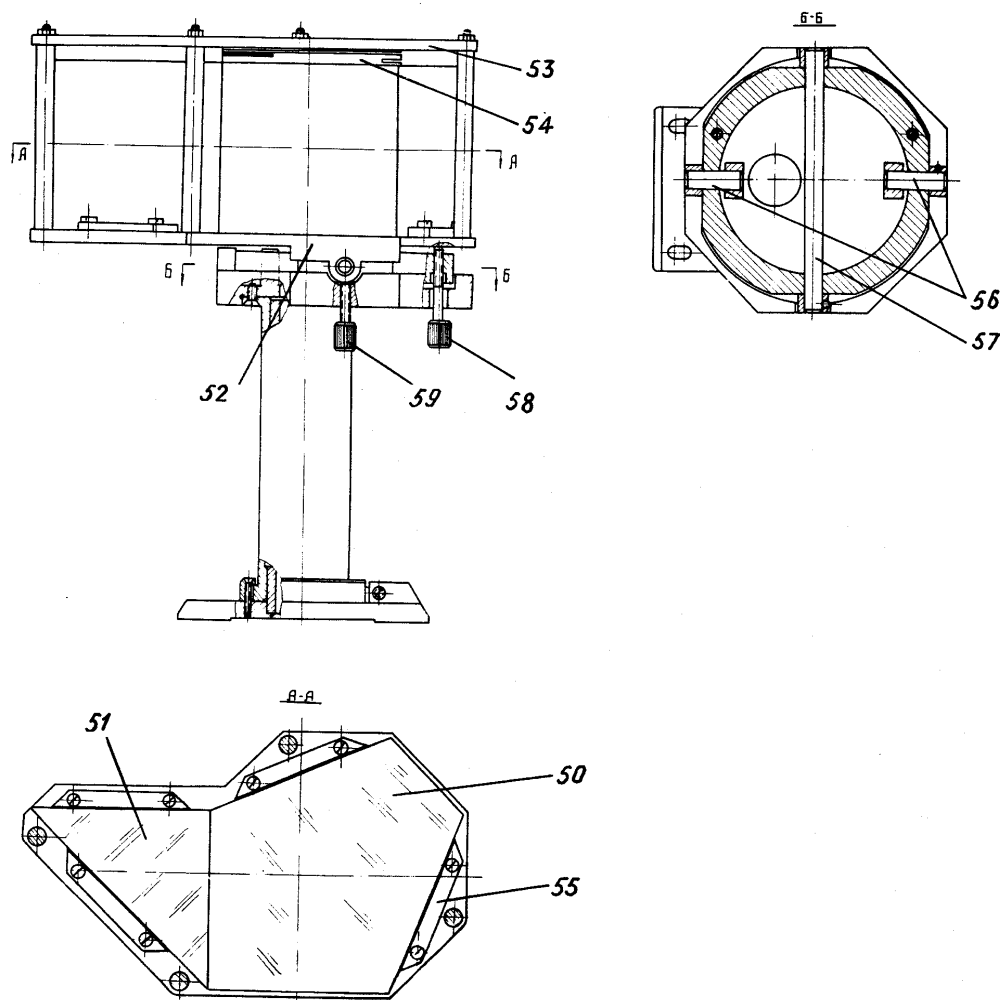
**ПРИМЕР 18.** На рис. 28 в схематичном виде изображена конструкция кронштейна призмного блока, составленного из прямоугольной призмы и пентапризмы, установленных вплотную катетными гранями на общей регулируемой платформе. Данная призмная система (с размерами входной грани  $100 \times 100$  мм) применена в оптическом телевизионном коммутаторе ОКТ-1М для получения требуемого обращения изображения.

Три кинематические вращательные пары и три пары юстировочных винтов позволяют наклонять платформу вокруг горизонтальных осей  $X$  и  $Y$ , а также поворачивать её вокруг вертикальной оси  $Z$ . Бобовидные отверстия в основании кронштейна предназначены для юстировочного сдвига всего узла с призмами на плоскости основания прибора вдоль оси  $X$ . Таким образом, конструктором предусмотрена возможность регулировки положения призмной системы по четырём степеням подвижности:  $\varphi_X$ ,  $\varphi_Y$ ,  $\varphi_Z$  и  $\Delta_X$ , что естественно отразилось на сложности узла и трудоёмкости его изготовления. Выясним, насколько обоснованно такое усложнение конструкции, которое к тому же не повышает его надёжности. Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо выяснить свойства данной призмной системы, определить её действенные подвижки в сходящемся пучке лучей, для чего, прежде всего, найти простейший зеркальный эквивалент системы, составленной из призм БП-90° и АР-90°.

Поскольку нормали к отражающим граням призмной системы компланарны, а число отражений нечётное, то эквивалентом этой системы является плоское зеркало в сочетании с перпендикулярным ему зеркальным



ромбом [34]. Причём, нормаль эквивалентного зеркала компланарна нормальям отражающих граней призмы, а отражающая плоскость параллельна осевым лучам падающего и отражённого пучка лучей и расположена на равном удалении от них. То есть плоскость эквивалентного зеркала совпадает с соприкасающимися гранями этих призм.



*Рис. 28. Конструкция платформы с призмным блоком, регулируемой по четырём степеням подвижности*

Теперь уже легче ответить на вопрос, какие дефекты вызывают наклоны и сдвиги данного призмного блока в системе координатных осей  $XYZ$ :

1. разворот вокруг оси  $Z$  на угол  $\varphi_Z$  вызывает угловое отклонение пучка лучей в горизонтальной плоскости на угол  $2\varphi_Z$ ;
2. наклон вокруг оси  $X$  на угол  $\varphi_X$  - почти недействен, так, например, сдвиг изображения (из-за эквивалентного ромба) при угле

наклона 10 угловых минут составит примерно 0,6 мм, однако при большем наклоне столь толстая стеклянная развёртка призм способна вызвать заметный хроматизм;

3. наклон вокруг оси  $Y$  на угол  $\varphi_Y$  вызывает наклон изображения вокруг осевого луча удвоенной величины, т.е.  $2\varphi_Y$ ;
4. сдвиги вдоль осей  $Y$  и  $Z$  – недействительны;
5. сдвиг вдоль оси  $X$  на величину  $\Delta_X$  вызывает сдвиг изображения вдоль оси  $X$  удвоенной величины -  $2\Delta_X$ .

Допуск на разворот  $\varphi_Z$ , следует ограничить величиной в несколько угловых минут, поскольку наклонная развёртка призмы и расфокусировка на краю поля способны заметно ухудшить качество изображения. Установку призмённого блока с такой точностью легко обеспечить даже без специальных регулировочных устройств разворотом кронштейна на базе. Наклон изображения кадра вокруг осевого луча можно ограничить допуском в 30 угловых минут. Причём, этот дефект легко устраняется наклоном самого проектора при настройке.

Таким образом, необходимо обеспечить лишь горизонтальность плоскости главного сечения составной призмы с погрешностью не более 10-15 угловых минут. Но для этого совершенно не обязательно (а точнее – нецелесообразно с точки зрения экономии затрат и надёжности) вводить в конструкцию «плавающую» платформу (см. рис.28). Действительно, для обеспечения прилегания катетных граней двух призм и взаимной параллельности их главных сечений, так или иначе, но их нижние торцовые базовые плоскости должны быть перпендикулярны рабочим граням. Остаётся лишь потребовать параллельности нижней опорной плоскости основания  $O$  кронштейна  $K$  и верхней установочной для призм плоскости платформы  $\Pi$ , теперь уже жёстко связанной со стойкой кронштейна (рис. 29). После устранения разворота  $\varphi_Z$ , необходимый сдвиг  $\Delta_X$  всего кронштейна с призмами можно осуществить с помощью направляющей линейки, прижатой к ровному краю (ребру) основания  $O$  кронштейна и в таком положении закреплённой на основании прибора на время юстировки. Этим приёмом достигается независимость юстировочного сдвига, то есть сохранение углового положения узла на базе.

**ПРИМЕР 19.** На рис. 30 представлена типовая конструкция регулируемого зеркала. Отличает её прежде всего простота изготовления. И хотя известны и другие, более удачные варианты подобной конструкции, интересующие нас свойства этих конструкций можно рассмотреть на примере типового представителя.

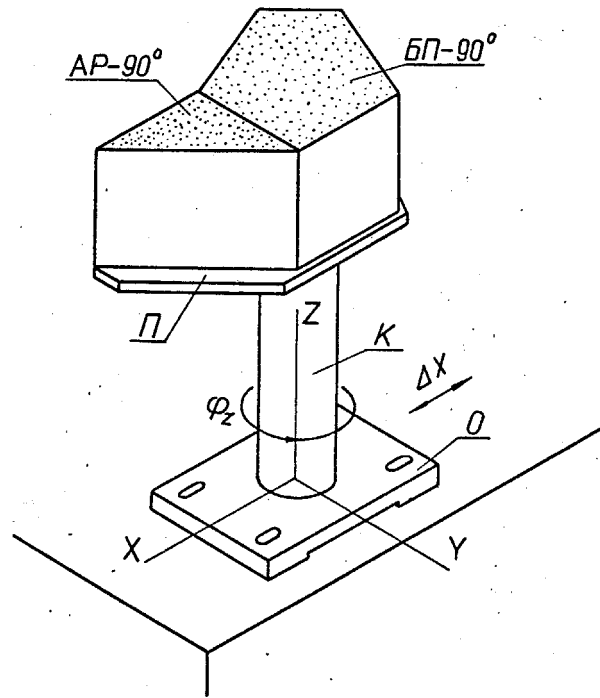


Рис. 29. Технологичная конструкция кронштейна с призмами

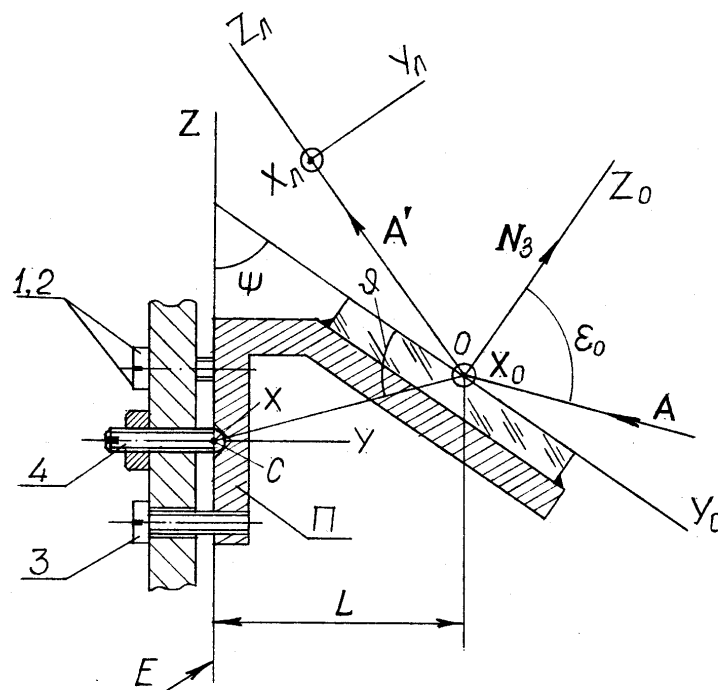


Рис. 30. Типовая конструкция узла регулируемого зеркала

Система трёх винтов 1, 2 и 3, расположенных треугольником, а также опорный винт 4 позволяют не только наклонять платформу П оправы зеркала на углы  $\alpha$  и  $\omega$  соответственно вокруг осей  $X$  и  $Z$  неподвижной системы координатных осей  $XYZ$ , но и сдвигать платформу вдоль оси  $Y$  на величину  $\Delta_Y$ . То есть конструкция реализует на практике три степени подвижности, совпадающие по виду с тремя действительными подвижками плоского зеркала в сходящемся ходе лучей. Однако непараллельность отражающей плоскости зеркала опорной плоскости  $E$  кронштейна ( $\psi \neq 0$ ) и удаление точки  $O$  падения осевого луча на расстояние  $L$  от этой плоскости могут стать причиной неэффективного и зависимого характера регулировочных перемещений. Так при наклоне зеркала вокруг оси  $X$  на угол  $\alpha$  точка  $O$  поверхности зеркала сместится по дуге окружности радиуса  $CO$  и при этом отражающая плоскость зеркала сдвинется вдоль нормали  $N_3$  на величину:

$$\Delta_{Z_0} = CO \cdot \alpha \cos \vartheta \approx L \alpha \cos \vartheta, \quad (1)$$

а центр зеркала сместится вдоль отражающей плоскости на величину:

$$\Delta_{Y_0} = CO \cdot \alpha \sin \vartheta \approx L \alpha \sin \vartheta, \quad (2)$$

где  $\vartheta$  - угол между прямой  $CO$  и плоскостью зеркала.

Сдвиг  $\Delta_{Z_0}$  обусловит децентрировку 2-го рода величины:

$$\Delta_{Y_L} = 2\Delta_{Z_0} \cdot \sin \varepsilon_0 \approx 2L \alpha \cdot \cos \vartheta \cdot \sin \varepsilon_0, \quad (3)$$

в лучевой системе координатных осей  $X_L Y_L Z_L$ . Чтобы устранить эту децентрировку кронштейн с зеркалом необходимо сдвинуть вдоль оси  $Y$  на величину

$$\Delta_Y = \Delta_{Y_L} / (2 \sin \varepsilon_0 \cdot \cos \psi) \quad (4)$$

Смещение  $\Delta_{Y_0}$  может вызвать срезание светового пучка.

При устранении децентрировки 1-го рода  $\varphi_{Y_L}$  - углового отклонения орта  $A'$  отражённого луча в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, - кронштейн с зеркалом необходимо наклонить уже вокруг оси  $Z$  на угол  $\omega$ , причём:

$$\omega = \frac{\varphi_{Y_L}}{2 \cos \varepsilon_0 \cos \psi}. \quad (5)$$

Здесь также возникает опасность срезания пучка из-за смещения зеркала  $\Delta_{X_0} \approx L \cdot \omega$ .

Анализ формул (4) и (5) показывает, что с увеличением угла  $\psi$  регулировка с целью устранения децентрировок  $\Delta_{Y_L}$  и  $\varphi_{Y_L}$  становится всё менее эффективной, а при  $\psi = 90^\circ$  - вообще недействительной. На рис. 31

показаны конструкции регулируемого зеркала и светоделительного кубика микроинтерферометра.

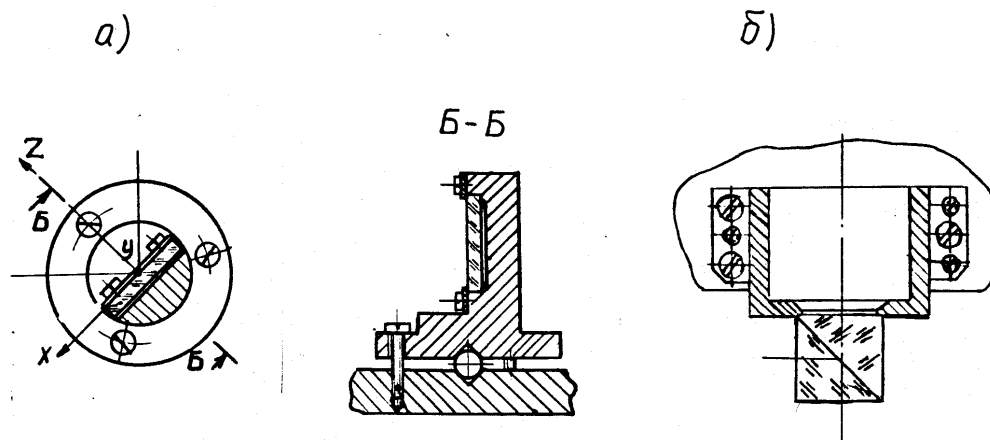
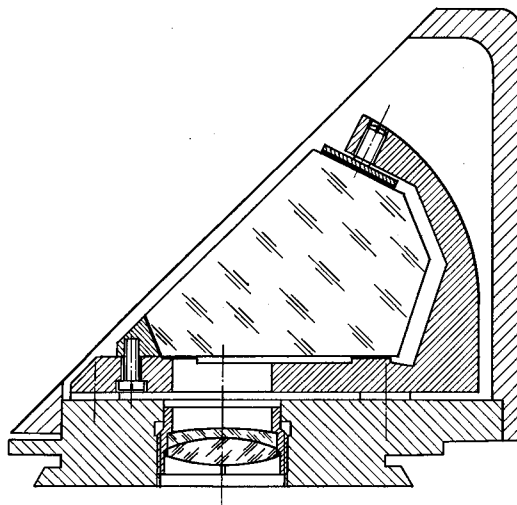


Рис. 31. Конструкция узлов: а) регулируемого зеркала и б) светоделительного кубика микроинтерферометра

Здесь отражающая плоскость зеркала и светоделительная грань кубика перпендикулярны опорным плоскостям своих кронштейнов. В результате у зеркала лишь одна степень подвижности совпадает с его действенной подвижкой. У кубика же, имеющего четыре действенные подвижки, реализовать можно только две. Более того, в этих конструкциях регулировочные винты сами препятствуют осуществлению недостающих регулировочных подвижек.

**ПРИМЕР 20.** В бинокулярной насадке, являющейся по сути функциональным унифицированным узлом целого ряда серийных стереомикроскопов, для получения прямого изображения и требуемого наклона окуляров к горизонту применяются призмы Шмидта с крышей. Фрагмент конструкции насадки с этой призмой показан на рис. 32.



*Рис. 32. Исходная конструкция узла бинокулярной насадки с призмой Шмидта*

В процессе юстировки насадки осуществляют центрирование оптической системы каждой её ветви таким образом, чтобы совместить с центром перекрестия окуляра изображение перекрестия марки специального коллиматора (выполняющего функцию образцового микроскопа) и при этом обеспечить взаимную параллельность осей пучков световых лучей, выходящих из окуляров от одной и той же точки предмета, в пределах известного прямоугольника допусков. Выполняется эта операция подвижками – в основном сдвигами на базе – оправы с призмой Шмидта. Причём, никаких регулировочных устройств, которые бы позволили сдвигать оправу с призмой в двух взаимно перпендикулярных направлениях раздельно и независимо, да ещё с требуемой чувствительностью, конструкцией не предусмотрены, хотя речь идёт о перемещениях в сотые доли миллиметра. Более того, чтобы осуществить требуемую подвижку призмы, насадку приходится разбирать, то есть отделять основание с призмами от корпуса с механизмом раздвижки окуляров, так как доступ к призмам для их регулировки конструкцией опять-таки не предусмотрен, а для осуществления этой операции на более ранней стадии недостаёт баз. Таким образом, оказывается, что подвижки призм осуществляются «вслепую» – не под контролем, и потому сама операция юстировки представляет собой многократное повторение цикла, включающего контроль, разборку, регулировку, повторную сборку и снова контроль.

Для устранения недостатков конструкции (с сохранением её оптической схемы) представляется логичным введение регулировочных устройств и обеспечение доступа к ним без разборки узла. Проработка конструкций различных вариантов регулировочных устройств показала, что устройства, обеспечивающие поступательные сдвиги призмы, потребуют увеличения габаритов насадки, что неизбежно отразится на оптической схеме. Но можно ли здесь применить устройства, обеспечивающие угловые перемещения призмы, как более предпочтительные из-за лучшей совместимости с габаритами и конструкцией исходного варианта насадки?

Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо, во-первых, выявить действенные повороты призмы, которые можно использовать для центрирования оптической системы, и определить их передаточные коэффициенты, а во-вторых, с помощью расчёта размерной цепи, замыкающим звеном которой и является величина несовмещения изображения центра перекрестия коллиматора с центром перекрестия окуляра, определить требуемый диапазон регулировочных подвижек. Это

имеет принципиальное значение, поскольку значительные наклоны призмы, имеющей толстую стеклянную развёртку, способны вызвать хроматизм изображения.

Призма Шмидта с крышей (ВкР-45°), как известно [13], относится к оборачивающим призмным системам, зеркальным эквивалентом которых является прямоугольное угловое зеркало в сочетании с зеркальным ромбом, перпендикулярным ребру этого зеркала. Влияние действенных поворотов призмы в системе координатных осей  $XYZ$ , плоскость  $XY$  которой совпадает с входной гранью призмы, а ось  $X$  – с ребром её двугранного угла 45°, а также в основной системе осей  $X_0Y_0Z_0$  (рис.33) на положение и ориентировку изображения в плоскости полевой диафрагмы окуляра показано в табл. 4.

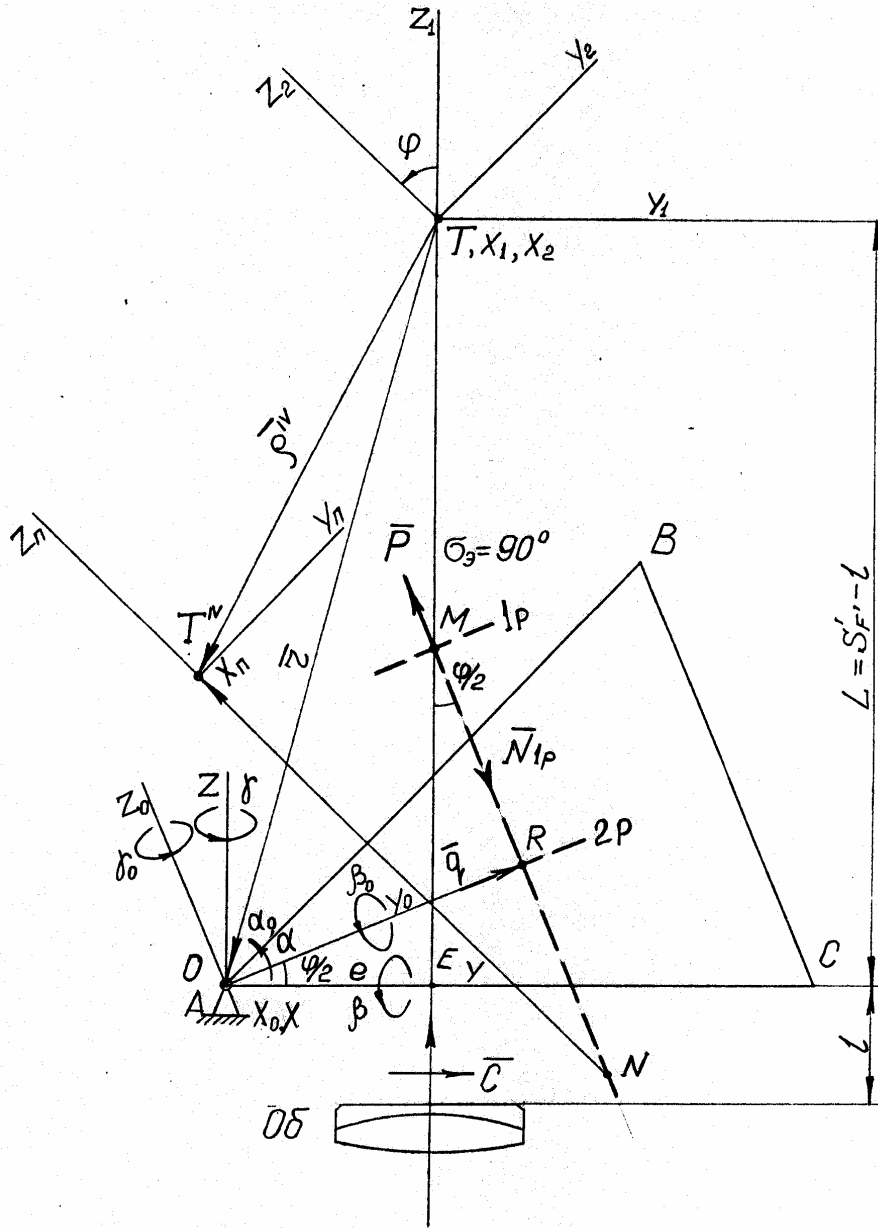


Рис. 33. К анализу действенных поворотов призмы Шмидта с крышей

Таблица 4

Влияние поворотов призмы Шмидта с крышей на местоположение и ориентировку изображения в плоскости полевой диафрагмы окуляра

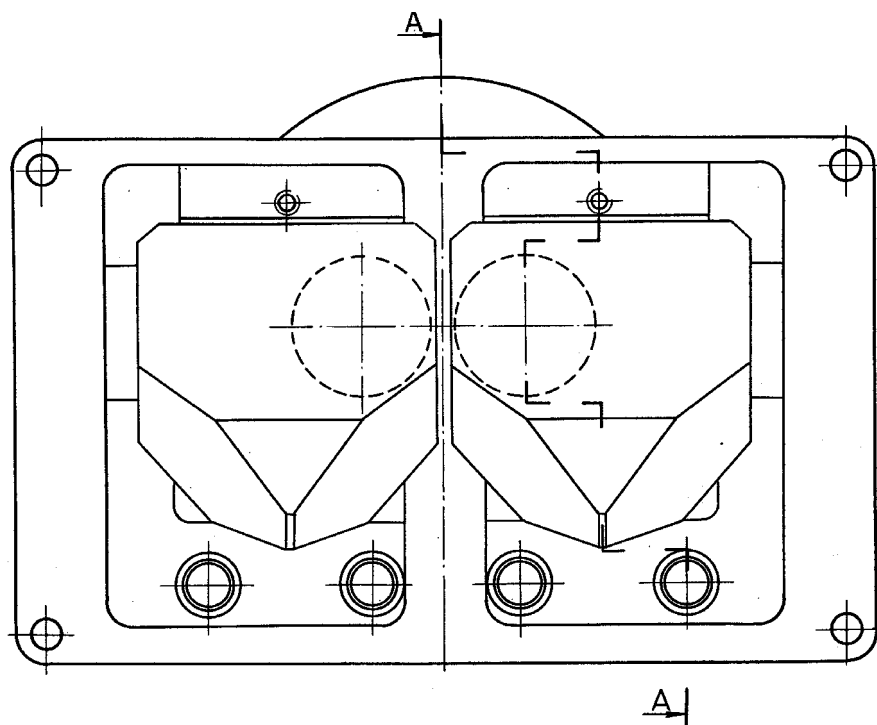
| В системе координатных осей<br>$XYZ$ |   | В системе координатных осей<br>$X_0Y_0Z_0$ |   |
|--------------------------------------|---|--|---|
| $\varphi_X$<br>( $\alpha$ )          | Вызывает сдвиг изображения<br>$\Delta_{\text{уп}} \approx 240\varphi_X$ | $\varphi_{X_0}$<br>( $\alpha_0$ )          | Вызывает сдвиг изображения<br>$\Delta_{\text{уп}} \approx 240\varphi_{X_0}$ |



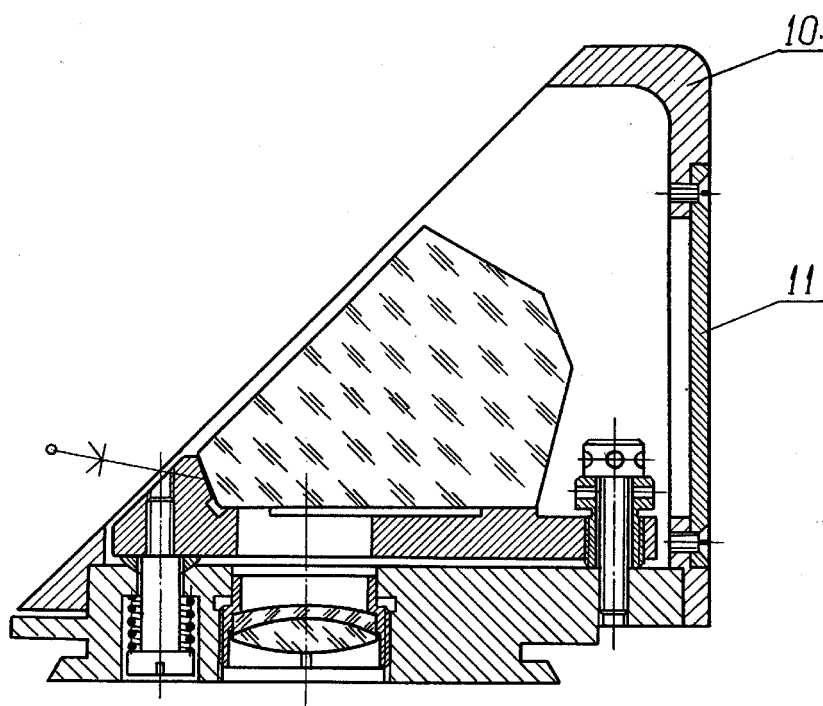
|                             |   |                                   |   |
|-----------------------------|---|-----------------------------------|---|
| $\varphi_Y$<br>( $\beta$ )  | Вызывает сдвиг изображения<br>$\Delta_{X\Pi} \approx 220\varphi_Y$<br>и его наклон<br>$\varphi_{Z\Pi} \approx 0,7\varphi_Y$ | $\varphi_{Y_0}$<br>( $\beta_0$ )  | Вызывает сдвиг изображения<br>$\Delta_{X\Pi} \approx 220\varphi_{Y_0}$<br>и его наклон<br>$\varphi_{Z\Pi} \approx 0,8\varphi_{Y_0}$ |
| $\varphi_Z$<br>( $\gamma$ ) | Вызывает сдвиг изображения<br>$\Delta_{X\Pi} \approx 30\varphi_Z$<br>и его наклон<br>$\varphi_{Z\Pi} \approx 0,3\varphi_Z$  | $\varphi_{Z_0}$<br>( $\gamma_0$ ) | Вызывает сдвиг изображения<br>$\Delta_{X\Pi} \approx 57\varphi_{Z_0}$   |

Здесь углы поворота призмы  $\varphi_i$  вокруг соответствующих осей задают в радианной мере, а смещения изображения вдоль осей координатной системы  $X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$  – получают в миллиметрах

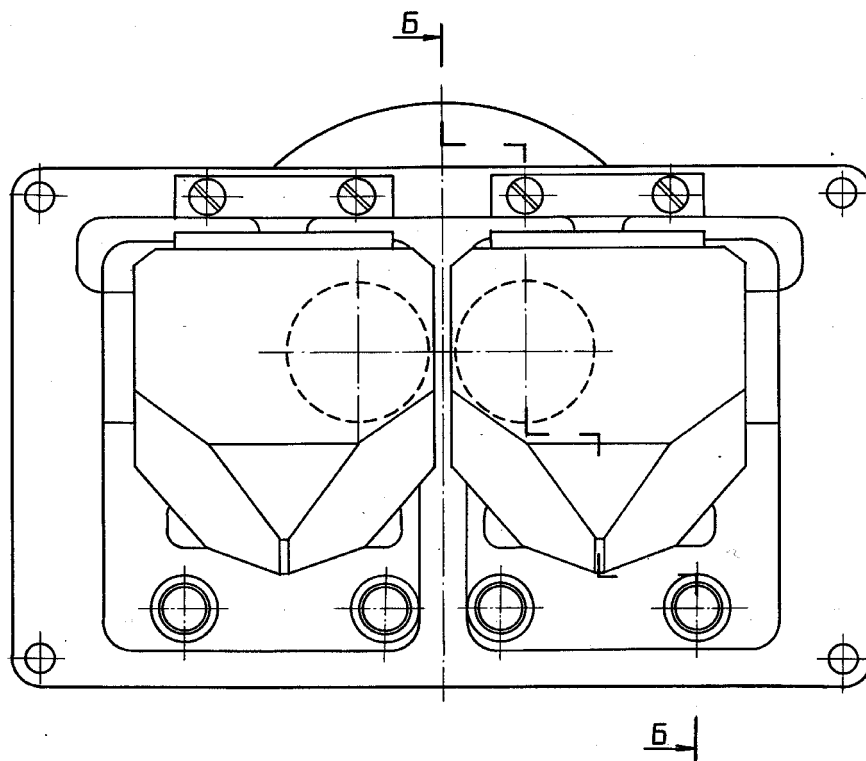
На рис. 34–36 представлены три варианта регулируемой конструкции оправы с призмой. Первые два варианта реализуют повороты призмы  $\varphi_X$  и  $\varphi_Y$  в системе координатных осей  $XYZ$  с помощью шарнира и пары резьбовых втулок и фиксирующих винтов. Третий вариант конструкции (рис. 36) реализует повороты призмы  $\varphi_{X_0}$  и  $\varphi_{Z_0}$  в основной системе осей  $X_0Y_0Z_0$ , что выгоднее, поскольку при этом не возникает наклона изображения. Регулировка здесь производится с помощью двух пар встречных винтов. Во втором и третьем вариантах применён шарнир на упругом элементе. В отличие от исходной конструкции (см. рис. 32) призмы здесь приклеиваются к оправам с помощью герметика УТ-34. Доступ к элементам регулировки обеспечен введением окна в задней стенке корпуса, которое после юстировки закрывается крышкой. Расчёты показывают, что наклоны развёртки призмы в результате проводимой юстировки не превысят 15 угловых минут.



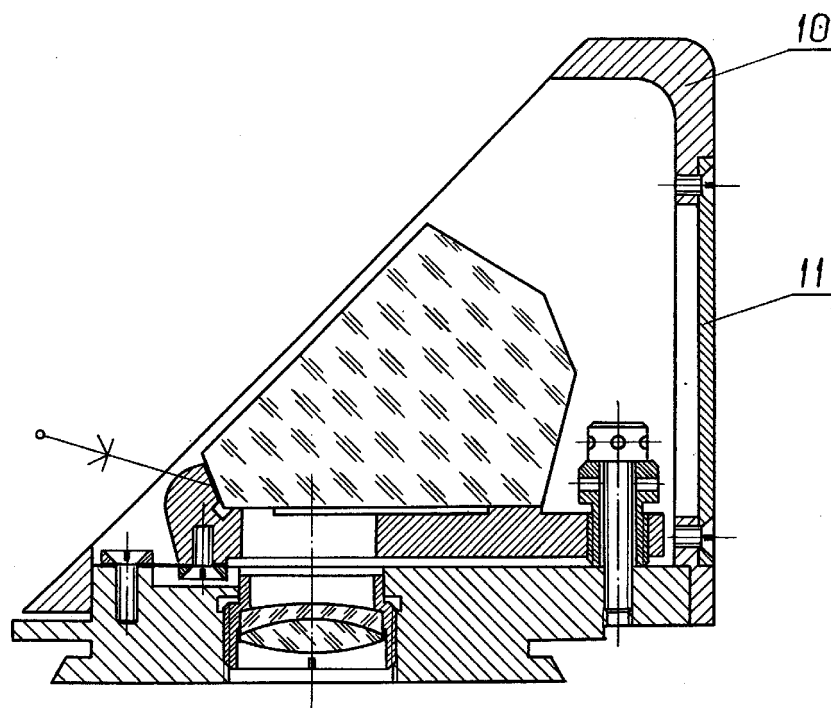
A-A (с дет. поз.10,11)



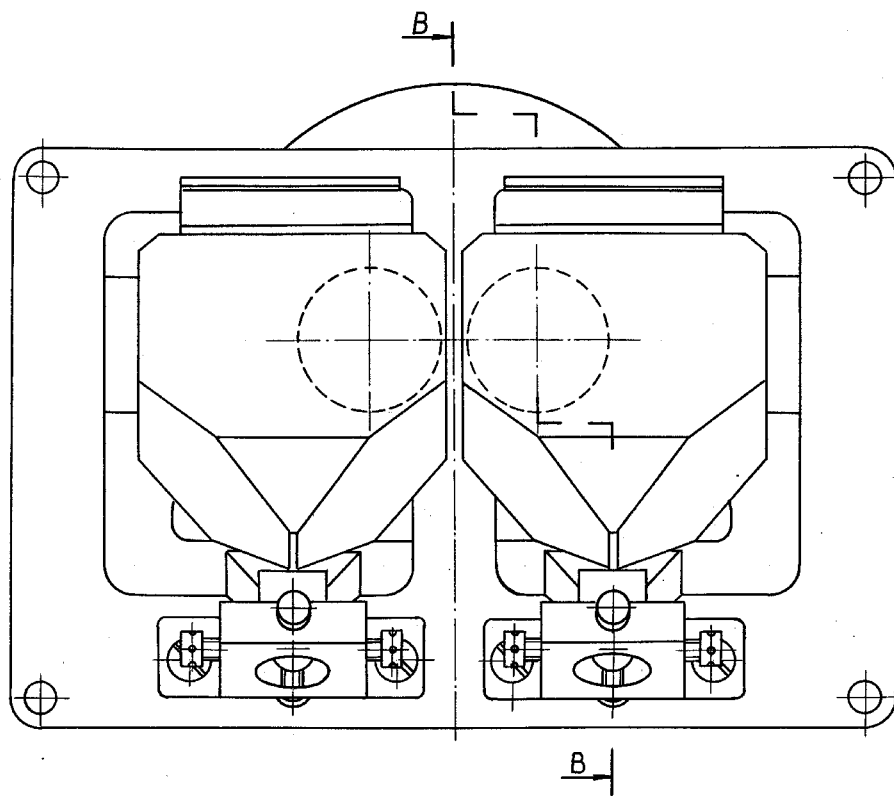
*Рис. 34. Регулируемая конструкция оправы с шарниром в виде сферической опоры*



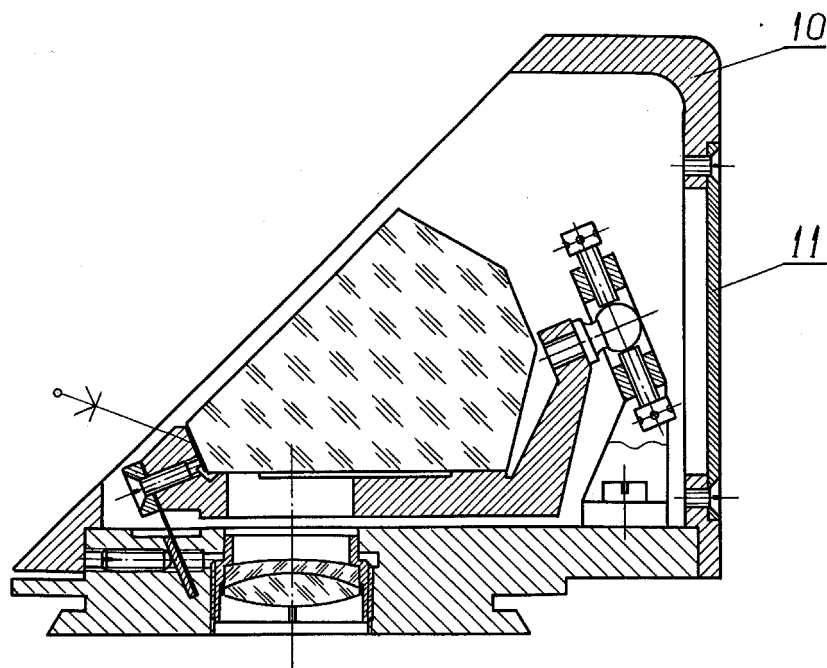
Б-Б (с дет. поз. 10, 11)



*Рис. 35. Регулируемая конструкция оправы с шарниром на упругом элементе*

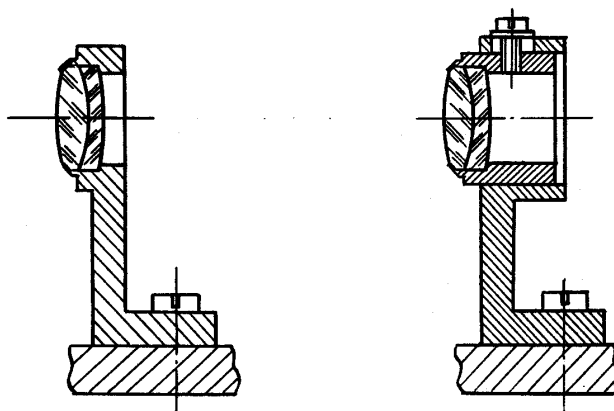


B-B (с дет. поз. 10, 11)



*Рис. 36. Конструкция оправы призмы, регулируемая в основной системе координатных осей*

**ПРИМЕР 21.** На рис. 37, а приведена конструкция кронштейна-оправы с линзой оборачивающей системы визирной измерительной трубы с отсчётом в поле зрения.



*Рис. 37. Конструкция кронштейна-оправы с линзой оборачивающей системы: а – исходная конструкция, б - измененный вариант*

По-видимому, стремление к простоте и компактности, а также к экономии металла предопределило решение конструктора осуществить закрепление линзы (завальцовку) непосредственно в кронштейне, имеющем вид угольника. Этот кронштейн с линзой, как и другие узлы оптической отсчётной системы, базируется и закрепляется на монтажной плате. И хотя завальцовка линзы в таком кронштейне ненамного сложнее, чем в оправе цилиндрической формы, всё же считать технологичной конструкцию самого кронштейна нельзя. Главный недостаток конструкции заключается в невозможности осуществить фокусирующую операцию, выполняемую в данной системе продольным перемещением линзы оборачивающей системы, без нарушения центрирования системы и появления сопутствующих дефектов изображения.

В изменённой конструкции (рис. 37,б) линза закреплена в цилиндрической оправе, которая в свою очередь установлена в отверстие кронштейна. Теперь конструкция позволяет производить продольные перемещения линзы при фокусировке, не нарушая достигнутого ранее центрирования системы. Причём, и операцию центрирования системы в этом случае осуществить значительно легче.

**ПРИМЕР 22.** На рис. 38 представлена конструкция телескопической системы Мерсенна, установленной перед объективом визира и обеспечивающей последнему режим слежения за воздушными целями.

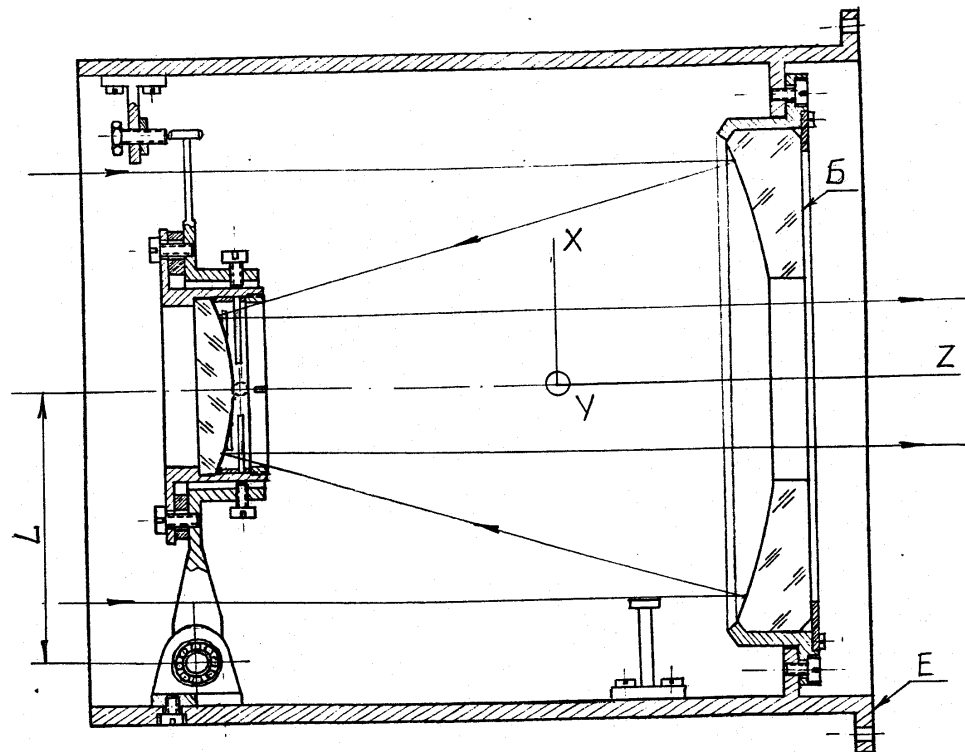


Рис. 38. Оптическая система Мерсенна  
телевизионного визира

В режиме поиска малое зеркало выводится из хода лучей. Зеркала этой системы, как известно, представляют собой параболоиды вращения и имеют фокусные расстояния  $f'_Б = 390$  мм,  $f'_М = 130$  мм. Световой диаметр большого зеркала  $D_Б = 360$  мм. Фокусное расстояние объектива основной системы  $f'_{Об} = 600$  мм, а его относительное отверстие 1: 5.

Оправа большого зеркала крепится непосредственно к внутреннему фланцу корпуса. Предварительно (путём пригонки) обеспечивается параллельность технологической базы зеркала «Б» и плоскости «Е» внешнего фланца корпуса, являющейся основной КБ всего узла. Таким образом, большое зеркало служит базой (задаёт базовую ось) при юстировке малого зеркала, у которого лишь одна степень свободы – поворот  $\varphi_Z$  вокруг оптической оси – инвариантна. Что же касается остальных подвижек, то расчёты, а позднее и практика показали, что для достижения хорошего качества изображения системы, требуемые точности установки зеркала должны составлять:

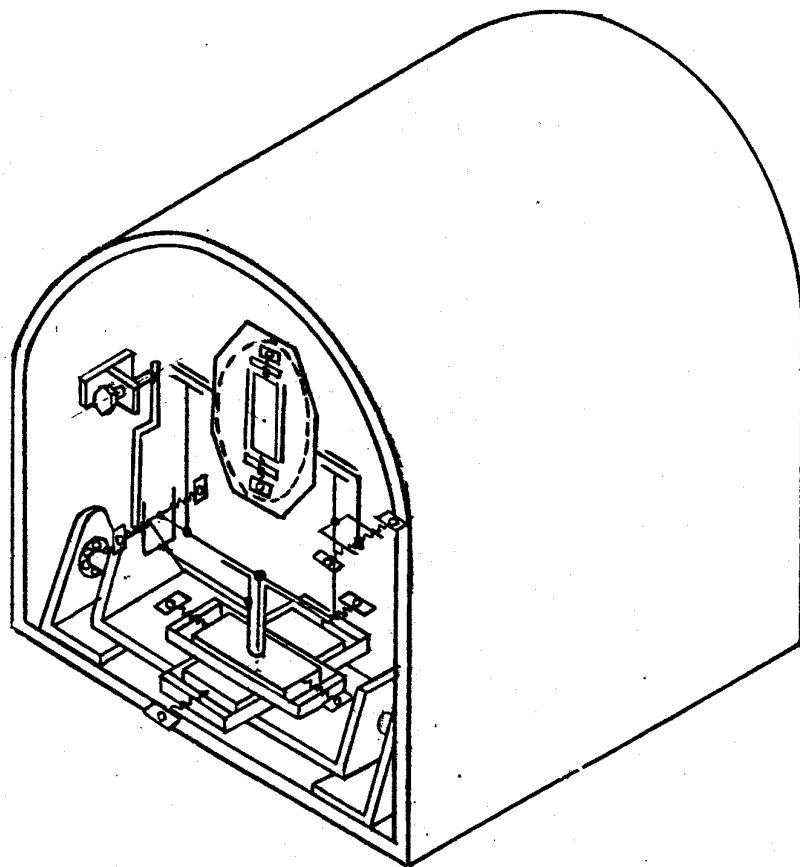
- по сдвигам:  $(\Delta_X)_{доп} = (\Delta_Y)_{доп} = 3 - 5$  мкм;  $(\Delta_Z)_{доп} = 1$  мкм;
- по наклонам:  $(\varphi_X)_{доп} = (\varphi_Y)_{доп}$  - до 10 угловых секунд.

Как видно из рисунка, оправа малого зеркала крепится фланцем к откидному кронштейну через прокладное кольцо, предназначенное для фокусировки системы путём подшлифовки его торцев. Сдвиги оправы зеркала поперёк оптической оси можно производить с помощью двух пар встречных винтов, правда, при этом винты, поджимающие фланец оправы к кронштейну, должны быть отпущены. Что касается наклонов зеркала, то легче всего выполняется наклон  $\varphi_Y$  вокруг оси  $Y$  – регулировкой упора, фиксирующего положение кронштейна с зеркалом в рабочем положении. Однако при этом одновременно происходит существенный сдвиг зеркала вдоль оптической оси  $\Delta_Z \approx \varphi_Y \cdot L$ . Наклон зеркала  $\varphi_X$  вокруг оси  $X$  можно выполнить разворотом на базе кронштейна с подшипниками поворотного устройства. Возможен и другой вариант – требуемые наклоны зеркала  $\varphi_X$  и  $\varphi_Y$  осуществить пришабровкой опорной плоскости кронштейна под прокладным кольцом.

Таким образом, ни одну из юстировочных подвижек (в условиях высочайшей чувствительности системы к разъюстировке) нельзя осуществить независимо и под контролем. Конструкция не обеспечивает воспроизводимости пространственного расположения зеркала с требуемой точностью после разборки и повторной сборки по завершении пригоночной операции. Оценивая вид и расположение в поле зрения дифракционного изображения точки, ещё можно определить характер требуемой подвижки, но почти невозможно (без специального измерительного комплекса на основе компьютера) рассчитать её величину. В таких условиях юстировку проводят методом проб и ошибок без гарантии успеха.

После продолжительных безрезультатных попыток отъюстировать эту систему, конструкция была «коренным образом» переделана с сохранением лишь корпуса узла и элементов крепления большого зеркала (рис. 39).

В изменённой конструкции малое зеркало располагает всеми пятью степенями подвижности (в системе осей  $XYZ$ ), реализуемыми с помощью соответствующих направляющих поступательного сдвига и вращения, а также регулировочных винтов. Но вот парадокс: несмотря на введение необходимых регулировочных подвижек независимого характера, конструкция не превратилась в юстируемую. Нагромождение в простом узле малого зеркала такого количества устройств регулирования со смещениями в неизбежных зазорах, с большими вылетами и упругими мёртвыми ходами, с недостаточной жёсткостью несущих элементов конструкции – лишило зеркало жёсткого и надёжного базирования, адекватного допускам на взаимное расположение зеркал, которые были приведены выше.



*Рис. 39. «Исправленная» конструкция системы Мерсенна*

Какие же рекомендации по отработке технологичности конструкции этой системы можно здесь дать? Прежде всего, учитывая исключительно высокие требования к точности взаимной установки зеркал, а также необходимость сохранения её в течение всего срока эксплуатации изделия, следует отказаться от большей части специальных регулировочных устройств, не обеспечивающих надёжной фиксации зеркала в условиях жёстких ударов, которые оно испытывает в моменты включения. Малые наклоны зеркала при окончательной юстировке лучше производить за счёт пришабривания (или путём доводки) трёх опорных платиков, к которым должна крепиться оправа зеркала. Регулировочные устройства потребуются лишь для поперечных сдвигов зеркала, да и то их функции могут быть с успехом переложены на съёмное регулировочное приспособление. Важным требованием к конструкции этих устройств должно быть отсутствие уводов при фиксации и возможность осуществления сдвигов без нарушения фокусировки. С этой целью для постоянного и надёжного контакта оправы зеркала с базирующей и направляющей плоскостью (даже при отпущенных крепёжных винтах) могут быть применены устройства упругого прижима,



например, с подпружиненными шариками. Под регулировочные винты на оправе зеркала необходимо установить закалённые подпятники. Для осуществления фокусировки следует предусмотреть возможность грубого перемещения зеркала (с погрешностью до 0,5 мм в диапазоне  $\pm 2$  мм) и точного перемещения (с погрешностью до 1 мкм в диапазоне  $\pm 0,5$  мм). Причём, для грубой фокусировки можно использовать, например, сдвиг на базе кронштейнов с подшипниками поворотного устройства, а для точной – шлифовку и доводку платиков специального опорного кольца.

Методика окончательной юстировки может быть следующей. Наблюдая за дифракционным изображением точки, поперечными сдвигами малого зеркала необходимо устранить кому. При этом изображение точки, наблюдаемое в фокальной плоскости объектива, установленного за системой Мерсенна, может оказаться смещённым с базовой оси. Для приведения изображения точки на базовую ось следует использовать малые наклоны зеркала. С этой целью опытным путём необходимо установить соответствие между толщиной снимаемого слоя материала с платика кольца и величиной смещения изображения. Зная направление и величину требуемого смещения изображения, можно определить величины съёма материала с каждого из двух платиков. С использованием специальных технологических приёмов и оснастки (которые известны механикам высокой квалификации) процесс пригонки может быть существенно ускорен. В последнюю очередь выполняется операция фокусировки.

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕЗУЛЬТАТИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

**ПРИМЕР 23.** Роль прогрессивной технологии в обеспечении технологичности конструкции можно проиллюстрировать на примере узла ахроматического измерительного компенсатора микроинтерферометра (рис. 40, а). Компенсатор предназначен для измерения разности хода, вносимой исследуемым объектом, и представляет в совокупности плоскопараллельную пластину переменной толщины, составленную из двух ахроматических клиньев, а точнее из двух пар клиньев, одна из которых неподвижна, а другая, расположенная на каретке, может перемещаться. В пределах всего диапазона работы компенсатор по своему оптическому действию должен представлять плоскопараллельную пластину, у которой входная и выходная грани параллельны, а отклонение световых лучей, прошедших сквозь систему клиньев, не превышает 30 угловых секунд. Более того, строгие требования предъявляются к воздушным промежуткам между клиньями: при допуске  $\pm 0,01$  мм они должны составлять всего 0,05 мм и не

иметь клиновидности, превышающей 1 угловую минуту. Воздушный промежуток между подвижной и неподвижной парами клиньев не должен изменяться в процессе работы.

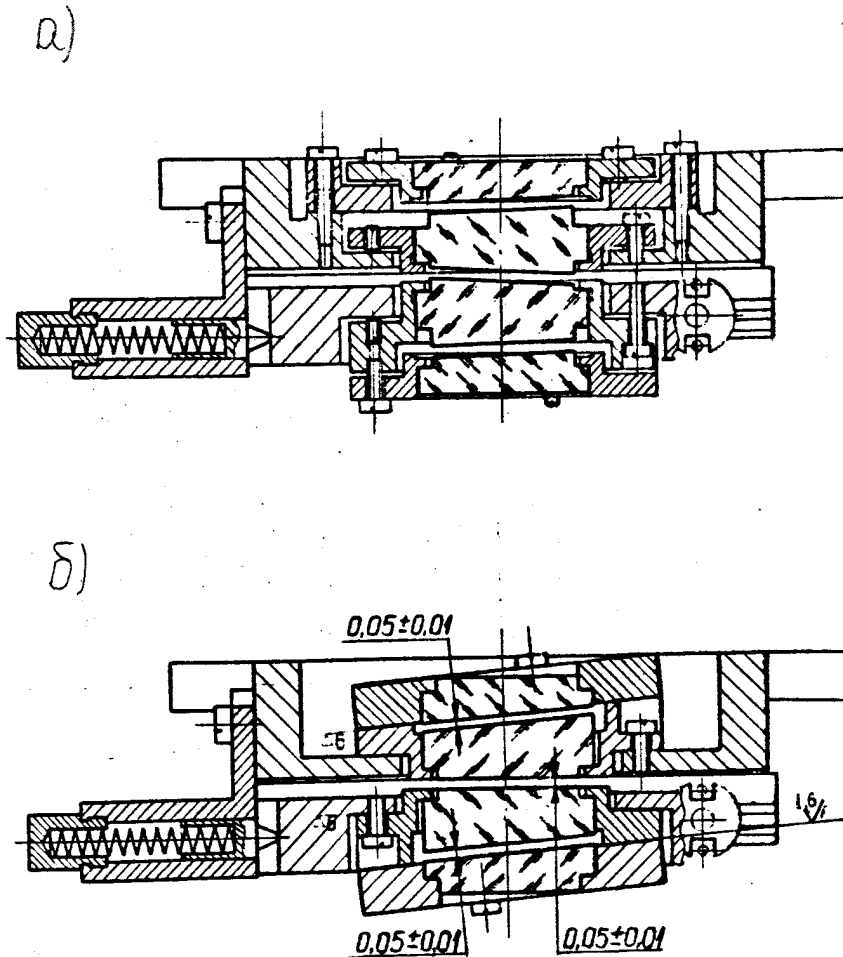


Рис. 40. Узел ахроматического измерительного компенсатора микроинтерферометра:

*а – исходная конструкция; б – модернизированный вариант*

Если направить ось  $Z$  неподвижной системы координатных осей  $XYZ$  вверх, по оптической оси системы, ось  $X$  – перпендикулярно плоскости рисунка, а ось  $Y$  – вправо (в плоскости рисунка), то из шести степеней свободы, которыми располагает каждый клин, как твёрдое тело, как элемент оптической системы, лишь две – сдвиги  $\Delta x$  и  $\Delta y$  вдоль соответствующих осей – являются недейственными, то есть не влияющими на обеспечение заданных требований. Каждый клин, ограниченный по контуру цилиндрической поверхностью и имеющий опорный буртик, вклеивается в собственную оправу с помощью герметика. В исходном, «регулируемом», варианте конструкции компенсатора (рис. 40,а) оправа каждого клина

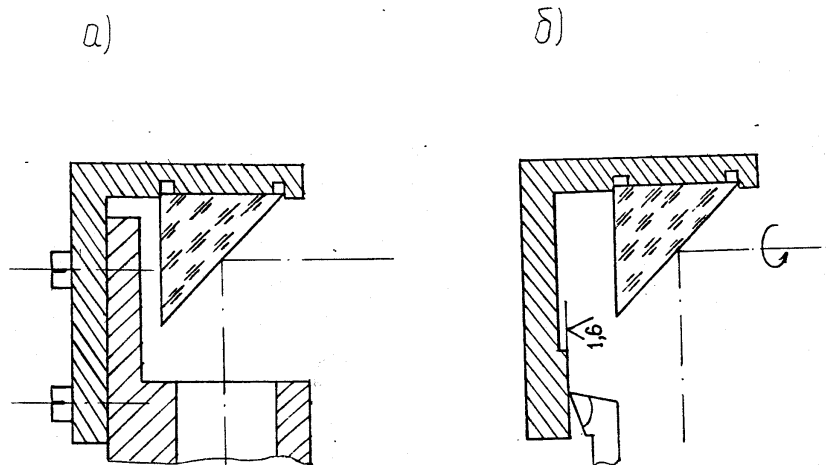
«подвешена» на трёх регулировочных винтах, расположенных через  $120^\circ$  по периметру фланца, и крепится к корпусной детали или к оправе соседнего клина с помощью трёх других винтов, сдвинутых по отношению к первым на  $60^\circ$ .

Для выполнения требований технических условий данная конструкция должна была бы обладать чувствительностью регулировочных подвижек не хуже  $0,004$  мм при осуществлении наклонов вокруг осей  $X$  и  $Y$ , а также  $0,08$  мм на диаметре оправы – при развороте вокруг оси  $Z$ . При кажущейся простоте юстировочной задачи, последняя оказалась неразрешимой, хотя работа была поручена высококвалифицированному оптику-механику. И причина неудачи заключалась не столько в сложном характере юстировки (регулировка по четырём степеням подвижности, с высокой точностью в условиях зависимого характера подвижек) или в сложном контроле, хотя всего этого нельзя сбрасывать со счетов, сколько в совершенно непригодной для данного характера регулировки клиньев конструкции. Подвешенность оправ с клиньями лишает возможности зафиксировать главные сечения клиньев от разворота вокруг оси  $Z$ . В то же время три избыточные связи неизбежно вызывают объёмные деформации деталей, а это не позволяет надеяться, что достигнутое в результате юстировки состояние и взаиморасположение элементов в узле сохранится. Это подтвердилось на практике, когда трижды всё же удавалось завершить юстировку с точностью, близкой к необходимой, но по истечении одного-двух часов «остывания» разъюстировка составляла уже несколько угловых минут.

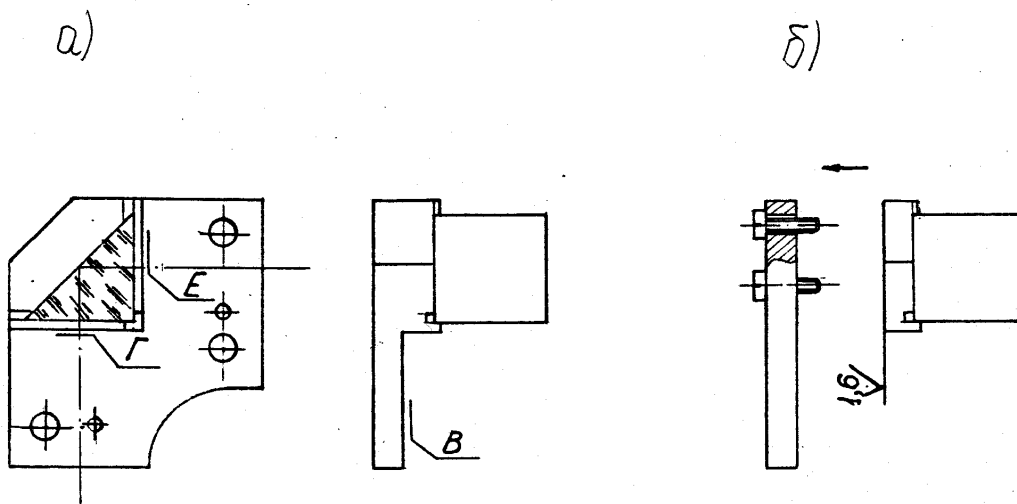
Решение этой задачи было найдено сборщиками, предложившими взамен регулировки результативную обработку опорных поверхностей оправ клиньев, позволившую наложить сразу три связи на взаимное расположение оптического клина и КБ узла и тем самым заранее (то есть до общей юстировки узла) обеспечить относительное расположение пары сопрягаемых узлов клиньев сразу по трём степеням свободы (рис. 40,б). Для реализации предложенного метода сборки было изготовлено простое приспособление [35], представляющее собой планшайбу, зажимаемую непосредственно в трёхкулачковом патроне токарно-арматурного станка, с шарнирно закреплённой обоймой. С помощью трёх регулировочных винтов обойма с заранее закреплённой в её гнезде оправой клина могла наклоняться вокруг шаровой опоры, не сдвигаясь с оси вращения шпинделя, и фиксироваться в необходимом положении. Перед подрезкой опорного фланца оправы клина устраняли биение автоколлимационного изображения от его наружной грани. «Пропылив» поверхность фланца «как чисто», с

помощью индикатора, установленного на суппорте станка, измеряли величину интересующей ступеньки и определяли величину окончательной подрезки фланца. Благодаря результативной обработке баз всех четырёх узлов в процессе общей сборки компенсатора оставалось лишь развернуть узлы на сопрягаемых плоскостях, обеспечив параллельность главных сечений клиньев между собой и ходу каретки.

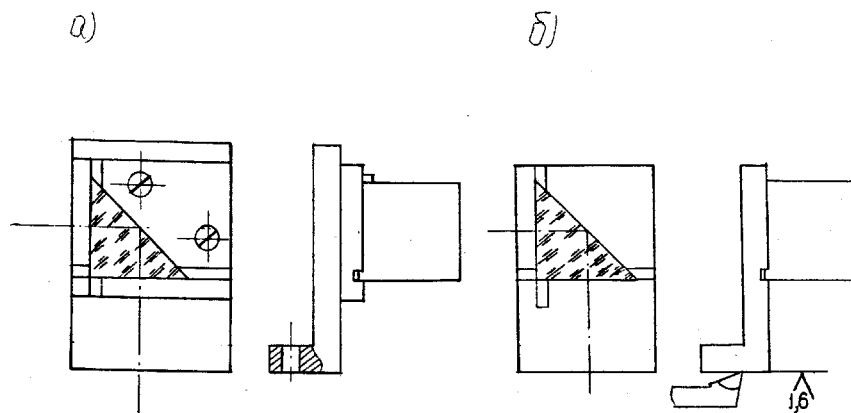
**ПРИМЕР 24.** На рис. 41 – 44 приведены примеры повышения технологичности конструкций узлов призм, установленных в сходящихся пучках лучей и подлежащих юстировке в процессе центрирования оптических систем.



*Рис. 41. Введение выборки на опорной плоскости угольника – оправы призмы и обеспечение возможности её результативной обработки*

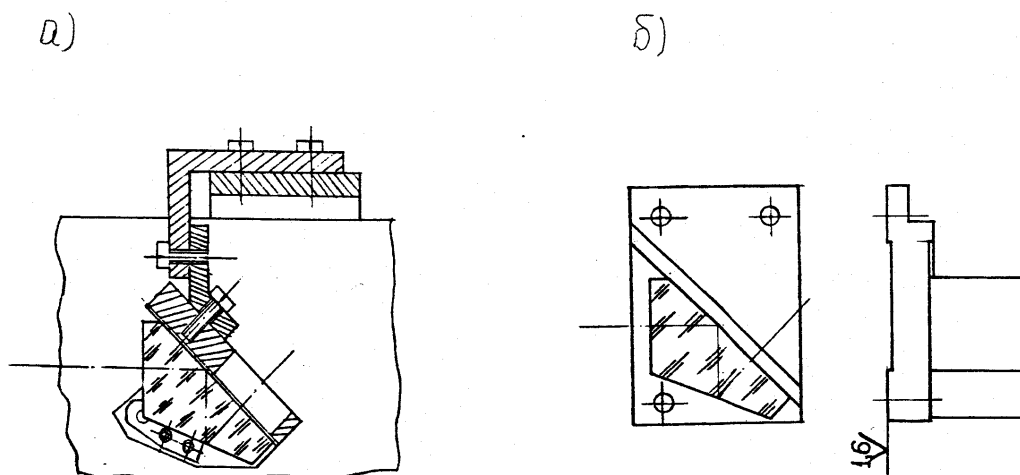


*Рис. 42. Замена оправы сложной конфигурации на оправу призмы, составленную из двух простых деталей*



*Рис. 43. Упрощение конструкции путём изъятия промежуточной оправы*

Суть изменений, внесённых в конструкции этих узлов, заключается в отказе от ручной пригонки опорных поверхностей, и даже регулировки с заменой их на результативную обработку баз и в обеспечении возможности осуществления этого метода сборки. Попутно же упрощаются конструкции оправ и повышается технологичность деталей, механическое крепление заменяется на клеевое с помощью герметика УТ-34, а неэффективная, зависимая регулировка (рис. 44) изымается вовсе.



*Рис. 44. Замена мостика призмы, составленного из четырёх кронштейнов, на одну деталь – оправу, базируемую непосредственно на стенке корпуса*

После модернизации узлов призм их юстировка производится лишь подвижкой на базе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 14.205-83. Технологичность конструкций изделий. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
2. Руководящие материалы по технологичности конструкций. Под общ. ред. С.Л. Ананьева. Гос. изд. оборон. пром. М.: 1954, 432 с.
3. ГОСТ 14.203-83. Правила обеспечения технологичности конструкций сборочных единиц. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
4. Методика отработки конструкций на технологичность и оценки уровня технологичности изделий машиностроения и приборостроения. Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 56 с.
5. Обеспечение технологичности конструкций изделий. Сб. статей. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 80 с.
6. Технологичность конструкций изделий. Справочник. Под ред. Амирова Ю.Д. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.
7. Оценка технологичности и унификации машин / В.Г. Кононенко и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 160 с.
8. Балабанов А.Н. Технологичность конструкций машин. – М.: Машиностроение, 1987. – 336 с.
9. Михельсон-Ткач В.Л. Повышение технологичности конструкций. – М.: Машиностроение, 1988. – 104 с.
10. Аруцов Ю.А., Слободянюк И.М. Конструирование элементов приборов: Учеб. пособие. – Л.: СЗПИ, 1987. – 83 с.
11. Технологические основы управления качеством машин / ТЗ8 А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко и др. М.: Машиностроение, 2003. – 256 с. ил. (серия «Библиотека технолога»).
12. Проектирование оптико-электронных приборов: Учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Ю.Б. Парвулюсов, С.А. Родионов и др.; Под ред. Ю.Г. Якушенкова. – М.: Логос, 2000. – 488 с.: ил.
13. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Под общ. ред. Панова В.А. – 3-е изд. – Л.: Машиностроение, 1980. – 742 с.
14. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов. Часть 1. Принципы конструирования оптических приборов и их

- элементов. Учебное пособие. – СПб.: СП.ГИТМО (ТУ), 1996. – 100 с.
15. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 237 с., ил.
  16. Справочник технолога-оптика. Под общ. ред. Кузнецова С.М. и Окатова М.А. – Л.: Машиностроение, 1983. – 415 с.
  17. Долинский И.М. Структурный анализ конструкций подвижных систем оптических приборов. Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1979. – 42 с.
  18. Грамматин А.П., Деген А.Б. Оценка технологичности оптических систем. – «Оптико-механическая промышленность», 1973, №7. С. 70-71.
  19. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 232 с.
  20. Русинов М.М. Техническая оптика. – Л.: Машиностроение, 1979. – 488 с.
  21. Рабинович В.Б. Теоретические основы построения методик юстировки сложных оптических систем. Уч. пособие. – Л.: ЛИТМО, 1991. – 71 с.
  22. Родионов С.А. Автоматизация проектирования оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1982. – 270 с.
  23. Зверев В.А., Иванова Т.А. Некоторые вопросы проектирования оптических приборов из базовых элементов. – «Оптико-механическая промышленность»: 1976, №10, С. 14.
  24. Иванова Т.А. Технологичность оптических систем. Уч. пособие. – Л.: ЛИТМО, 1982. – 37с.
  25. Панов В.А., Андреев Л.Н. Оптика микроскопов. Расчёт и проектирование. Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1976. – 432 с.
  26. Родионов С.А., Шехонин А.А. Методология проектирования оптических приборов. Учебное пособие / Под общ. ред. проф. М.И. Потеева. – СПб: 1996. – 84с.
  27. Волосов Д.С. Фотографическая оптика: (Теория, основы проектирования, оптич. характеристики). Учебное пособие для киновузов. – 2- изд. - М.: Искусство, 1978. – 543 с.
  28. Данилевич Ф.М. и др. Сборка и юстировка оптических контрольно-измерительных приборов. Спр. пособие. – Л.: Машиностроение, 1976. – 256 с.

29. Трегуб В.П., Бурбаев А.М. Юстировка визирной трубы ППС-11. «Оптико-механическая промышленность», 1978, №1, С. 39-41.
30. Погарев Г.В. О визирных осях зрительных труб. – Теория и расчёт оптико-механических приборов. – Тр. ЛИТМО, 1949, вып.4.
31. Плотников В.С. и др. Расчёт и конструирование оптико-механических приборов. Учебник для техникумов. – М.: Машиностроение, 1983. – 256 с.
32. Маламед Е.Р., Рагузин Р.М. Функциональные узлы приборов. Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1985. – 80 с.
33. Долинский И.М. Оригинальная конструкция направляющих с трением скольжения типа «ласточкин хвост». «Оптико-механическая промышленность», 1986, № 5.
34. Погарев Г.В., Бурбаев А.М., Кручинина Н.И. Методика нахождения эквивалентов зеркально-призмных систем. Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1983. – 46 с.
35. Бурбаев А.М. Результативная обработка баз узлов и её место в сборке оптических приборов. – В сб.: «Конструирование и производство оптических приборов». – Тр. ЛИТМО, вып. 90, Л.; 1977. – С. 55 – 58.





## Кафедра Компьютеризации и проектирования оптических приборов

Заведующий кафедрой: *д.т.н, проф. С.М. Латыев.*

Кафедра Компьютеризации и проектирования оптических приборов (первоначальное название «Кафедра военных оптических приборов», позднее - «Специальных оптических приборов») была основана в 1939 году. Она была призвана подготавливать инженеров по проектированию военных оптических приборов.

Как известно, к 1914 году потребности армии и флота удовлетворялись зарождающейся отечественной оптической промышленностью (включая филиалы фирм Цейсс и Герц в Риге) только на 30-40%. Остальные оптические приборы экспортировались. Фирма Карл Цейсс поставляла дальномеры, перископы сухопутные и для подводных лодок, бинокли, светосигнальные приборы. Фирма Герц – полевые артиллерийские панорамы, бинокли, большие стереотрубы, дальномеры, перископы для подводных лодок. Фирма Барр и Струд (Англия) поставляла оптические дальномеры, а фирма Росс - прямые зрительные трубы для морских прицелов. Фирмы Краус, Парра Мантуа (Франция) поставляли призмённые бинокли. Фирма Офичино Галилео (Италия) продавала перископы для подводных лодок.

Возглавил кафедру известный специалист в области военных оптико-механических приборов профессор К.Е. Солодилов. На кафедру из Государственного оптического института пришли работать профессора Резунов М.А. и Цуккерман С.Т. Под их руководством на кафедре проводилась также и научно-исследовательская работа. Были разработаны, например, конструкции новых прицелов: пулеметного ПП1, авиационного АСП, ракурсного курсового.

В послевоенный период времени до 1970 года кафедру возглавлял проф. С.Т. Цуккерман, с 1971 по 1984 гг. заведовал кафедрой проф. Сухопаров С.А. (бывший главный инженер ЦКБ фирмы ЛОМО), в 1985 –90 гг. руководил кафедрой заслуженный деятель науки и техники проф. Зверев В.А.. С 1990 кафедрой заведует их ученик проф. Латыев С.М.

Выпускники кафедры всегда славились как хорошие конструктора, благодаря сильной проектно-конструкторской научно- педагогической школе, созданной Солодиловым К.Е., Цуккерманом С.Т., Резуновым М.А., Кулагиным В.В., Сухопаровым С.А.. Сотрудниками школы написано около двадцати монографий, учебных пособий и справочников по проектированию оптических приборов, ставших настольными книгами студентов и инженерно-технических работников оптической промышленности.

Основные научные направления работы кафедры связаны с разработкой теоретических основ конструирования оптических приборов, их точностного расчета и юстировки, автоматизацией функционирования приборов и их

проектирования, а также с созданием автоматизированных измерительных фотоэлектрических приборов.

На кафедре были разработаны подобные приборы различного назначения:

- Механокардиограф для медицинских учреждений;
- Прибор для измерения скоростей и давления жидкостей;
- Прибор управления по лучу строительными машинами;
- Кинематомер для контроля точности зубчатых колес и редукторов;
- Стенд для контроля прецизионных муфт;
- Телевизионный дальномер;
- Стенд для контроля надежности биноклей;
- Фотоэлектрический автоколлиматор;
- Цифровой индикатор перемещений.

По результатам научных исследований аспирантами и сотрудниками кафедры были защищены десятки кандидатских и докторских диссертаций.

В настоящее время кафедра отошла от подготовки студентов только по военным оптическим приборам и имеет четыре специализации выпускников:

- «Специальные оптические приборы» – по которой подготавливаются инженеры (магистры) по разработке, юстировке, контролю и обслуживанию оптической техники военного назначения, а также космическим и гражданским приборам, которые эксплуатируются в специальных условиях или имеют особые характеристики;
- «Автоматизация оптических приборов» - по которой подготавливаются инженеры (бакалавры и магистры) широкого профиля, занимающиеся разработкой, исследованием и эксплуатацией приборов различного назначения: измерительных, геодезических, медицинских, астрономических, связи и передачи информации и т.д..
- «Сборка, юстировка, испытание и контроль оптических приборов» - подготовка инженеров (бакалавров) по производству и эксплуатации оптических приборов.
- «Метрология и сертификация оптико-электронных приборов» - подготовка инженеров (бакалавров) для метрологических служб и организаций осуществляющих сертификацию продукции.

Студенты, обучающиеся на кафедре, имеют усиленную подготовку по использованию средств автоматизированного конструирования, контролю, юстировке и испытанию приборов, вопросам обеспечения точности их функционирования.

На кафедре имеются следующие учебные лаборатории: Компьютерный класс; Конструкторский класс; Приборов технического зрения; Военных приборов; Оптических приборов; Контроля и юстировки приборов. Ряд учебных занятий по военным и космическим приборам проводится в лабораториях базовых кафедр при ГОИ и ЛОМО.

По учебной и научной работе кафедра имеет многолетнее сотрудничество с Техническим университетом Ильменау (Германия), благодаря которому наиболее

успевающие студенты, аспиранты и сотрудники кафедры стажируются в лабораториях этого университета.

В настоящее время штатное расписание кафедры состоит из 12-ти ставок профессорско-преподавательского состава (три профессора и шесть доцентов) и трех инженеров. На кафедре обучается восемь аспирантов и магистрантов.