

# СТАБИЛЬНОСТЬ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

© 2011 г. Р. М. Рагузин\*, канд. техн. наук; Е. Ю. Задорин\*\*

\* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

\*\* ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

Рассмотрены основные факторы, влияющие на несущие конструкции оптических приборов, включая и микроскопы. Сформулированы рекомендации по оптимизации несущих конструкций оптических приборов.

**Ключевые слова:** системное проектирование, несущие конструкции, объемные деформации, контактные деформации.

Коды OCIS: 120.4640, 220.4840

Поступила в редакцию 02.06.2010

## Основные факторы, влияющие на несущие конструкции оптических приборов

Несущие конструкции (НК) относятся к числу основных составных частей (СЧ) приборов и в значительной степени определяют конструкцию, функционирование, стабильность и удобство эксплуатации оптических приборов (ОП). Существенны и затраты на изготовление НК. В микроскопах, интерферометрах, телескопах, спектральных и других приборах они составляют от 30 до 70% стоимости и металлоемкости изделия. Однако, несмотря на важную роль НК, обобщение теории и опыт их разработки практически отсутствуют. Используя методику системного проектирования [2], рассмотрим основы разработки НК. На рис. 1а представлена структурная схема оптико-информационных приборов, определяющая связь ОП с объектом, оператором и внешней средой, а на рис. 1б – более детальная схема ОП, включающая его основные СЧ.

Из взаимодействий между СЧ ОП, объектом, оператором и внешней средой вытекают следующие общие требования к НК:

1. Надежность функционирования и управления требует стабильности прибора в пространстве и времени. Это условие включает комплекс качественных и количественных требований, касающихся оптических, механических и электронных подсистем.

2. Условия эксплуатации, связанные с объектом, оператором и той средой, в которой находится ОП.

3. Технологичность НК, т. е. обеспечение заданных свойств при наименьших затратах. Определяются серийностью производства, минимальной трудоемкостью изготовления деталей, сборки и юстировки, широкой унификацией конструкции, простотой контроля и другими требованиями, непосредственно вытекающими из технологии изготовления.

4. Требования по обеспечению экономической эффективности можно разделить на внешние, касающиеся функционирования ОП, и



Рис. 1. Структурные схемы ОП.

внутренние, определяющие стоимость изготовления.

Общее число факторов, влияющих на НК, превышает несколько сот единиц. Их количество постоянно пополняется по мере появления новых ОП и принципов их действия, а также при изменении условий эксплуатации.

Компоненты НК характеризуют конструктивные схемы, определяющие композицию (взаимодействие) основных составных частей в пространстве в соответствии с целевой функцией ОП [1]. В общем случае пространственное взаимодействие системы “ОБЪЕКТ-ОП” характеризуется изменением трех систем координат: прибора, объекта (по 6 степеней свободы) и их перемещением относительно абсолютных координат. Таким образом, минимальное число степеней свободы (перемещений) составит 216. Если учесть, что у многих ОП и объектов происходит несколько перемещений по отдельным координатам, то число возможных пространственных взаимодействий системы “ОБЪЕКТ-ОП” значительно возрастает.

По формообразованию различают следующие НК:

1) моноблочные, использующие жесткий корпус, выполненный из одной или нескольких соединенных деталей;

2) трубчатые. Такие НК широко применяются при разработке оптических узлов, компонентика которых определяется оптической осью;

3) НК, использующие кронштейны для установки оптических элементов на одну или несколько плоских поверхностей;

4) рамные НК;

5) НК, употребляющие направляющие различного типа;

6) НК в различных комбинациях.

На развитие НК большое влияние оказывает эволюция ОП, большинство которых проходит

несколько стадий развития. На первом этапе прибор полностью обслуживается оператором, а на втором – системы его функционирования и управления частично автоматизируются. На этих этапах НК обычно меняется незначительно, поскольку они должны учитывать функции оператора. На третьем этапе, при переходе к полной автоматизации, НК претерпевают большие изменения.

Стабильность НК характеризуется такими параметрами, как жесткость, виброустойчивость, термозащищенность и т. п.

Для функционирования оптико-информационных приборов наиболее опасны смещения объект – оптическая система – приемник информации. Для оценки пространственной стабильности НК целесообразно их разделить на два основных типа: консольные и порталные (арочные). Первый тип характеризуется тем, что оптическая ось прибора смещена относительно опорных механических плоскостей, у второго типа оптическая ось находится между опорными плоскостями.

В таблице показано распределение случайной выборки из более чем 80 наименований НК по формообразованию и пространственной стабильности.

Смещения НК и узлов ОП влияют на положение световых пучков, что приводит к искажениям оптического сигнала. Влияют они и на механические свойства узлов: точность перемещений, виброустойчивость ОП и т. д.

Смещения  $\delta$ , возникающие в ОП, имеют упругий и остаточный характер. Упругие деформации  $\delta_y$  исчезают после снятия нагрузки, тогда как остаточные  $\delta_{ост}$  смещения сохраняются. Величина упругих деформаций растет с ростом нагрузки, тогда как остаточные при этом меняются мало (предполагается, что величина нагрузки не приводит к разрушению приборов).

Распределение НК по формообразованию и пространственной стабильности

Тип НК	Характеристика НК	Количество	Примеры применения
Консольные	Стойка Г-образной формы	20	Микроскопы
	Плита со стойками	12	Спектральные приборы
	Оптическая скамья	2	
	Направляющие со стойками	6	Телескопы, геодезические приборы
Портальные, арочные	Арочные	4	Интерферометры, микроскопы
	Трубчатые	27	Лазеры, телескопы, объективы, интерферометры
	Моноблочные	10	Фотоаппараты, видеокамеры
	Рамные	3	Спектральные приборы

Таким образом:

$$\delta = \delta_y + \delta_{\text{ост.}}$$

Общее смещение  $\delta$  включает:

1. Объемные деформации  $\delta_{\text{об}}$  корпусов, стоеч, направляющих и других деталей.
2. Контактные деформации  $\delta_k$  в местах соединения деталей.
3. Деформации смазочных слоев  $\delta_{\text{см}}$  в подвижных соединениях.
4. Смещения в зазорах  $\delta_z$  подвижных соединений, необратимые деформации деталей, обусловленные наличием микронеровностей и т. п.

Таким образом:

$$\delta = \Sigma \delta_{\text{об}} + \Sigma \delta_k + \Sigma \delta_{\text{см}} + \Sigma \delta_z.$$

Число элементарных деформаций составляет, как правило, десятки единиц, даже в сравнительно простых механизмах. Так, в соединении, включающем всего три детали (основание, стойка и хотя бы два крепежных элемента), число деформаций не менее восьми-десяти. Таким образом, смещение сложного механизма образуется в результате суммирования достаточно большого числа независимых элементарных смещений, каждое из которых оказывает малое влияние.

Исследования узлов ОП [3] показали, что для консольных нагрузок связь между смещениями и нагрузками близка к линейной. Поэтому под линейной статической жесткостью сложного механизма или иной сложной конструкции понимается отношение:

$$C = 1/\delta \cdot P = k \cdot P,$$

где  $C$  – жесткость конструкции, Н/мм;  $P$  – усилие, приложенное к механизму, Н;  $\delta$  – смещение механизма в направлении действия силы, мм;  $k$  – коэффициент податливости,  $\text{мм}^{-1}$ ,  $k = 1/\delta$ .

Кроме поступательных деформаций, характеризуемых линейными смещениями  $\delta$ , в приборах могут существовать и угловые смещения.

В этом случае угловая жесткость  $C_\phi$  равна:

$$C_\phi = M/\phi,$$

где  $M$  – момент, Н·мм;  $\phi$  – угол поворота.

Смещения возникают от действия внешних и внутренних сил, которые в лабораторных ОП обычно находятся в пределах от 1 до 30 Н.

Очевидно, что смещения НК и механизмов не должны превышать отклонений допустимых для функционирования ОП. Например,  $0,1\lambda$  для интерференционных, голограмических и дру-

гих ОП, использующих интерференцию световых волн; кружка рассеяния для приемников изображения 10–80 мкм, глубины изображения и т. п.

Поэтому необходимая жесткость НК, например, у лабораторных ОП, в плоскости, перпендикулярной оптической оси, по координатам  $X$  и  $Y$  находится в пределах от  $5 \times 10^4$  до  $10^6$  Н/мм и по оси  $Z$  от  $10^3$  до  $3 \times 10^4$  Н/мм. Для каждого разрабатываемого прибора необходимую жесткость конструкции следует определять с учетом конкретных условий функционирования. Если НК и механизмы обеспечивают необходимую жесткость, то работа ОП проводится в оптимальных условиях.

На рис. 2 показан стенд для измерения смещений НК микроскопов. Нагрузки на узлы создаются с помощью разновесов, смещения измеряются окулярным микрометром.

Исследования около 50 отечественных и зарубежных микроскопов показали, что зависимость между нагрузками и смещениями имеет вид гистерезисной петли и близка к линейной (коэффициент корреляции не менее 0,85). Величина упругих смещений обычно в несколько раз превышает остаточные смещения.

На рис. 3 приведены результаты исследований направляющих скольжения (рис. 3а), ка-

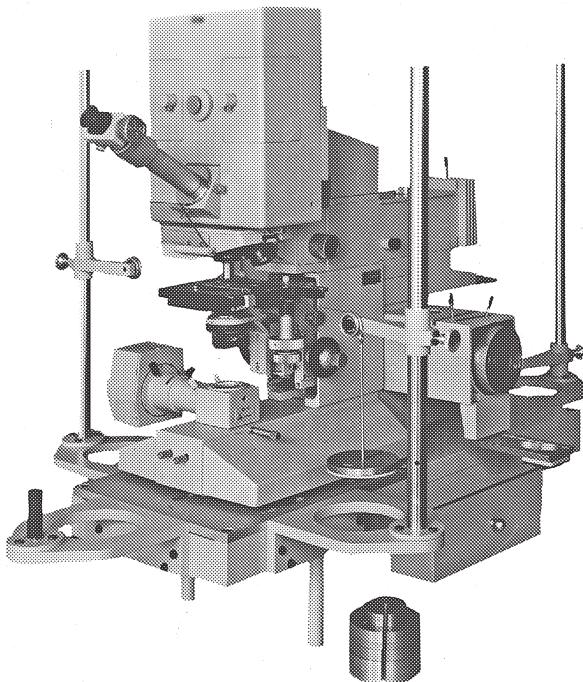


Рис. 2. Стенд для измерения смещений НК микроскопов.

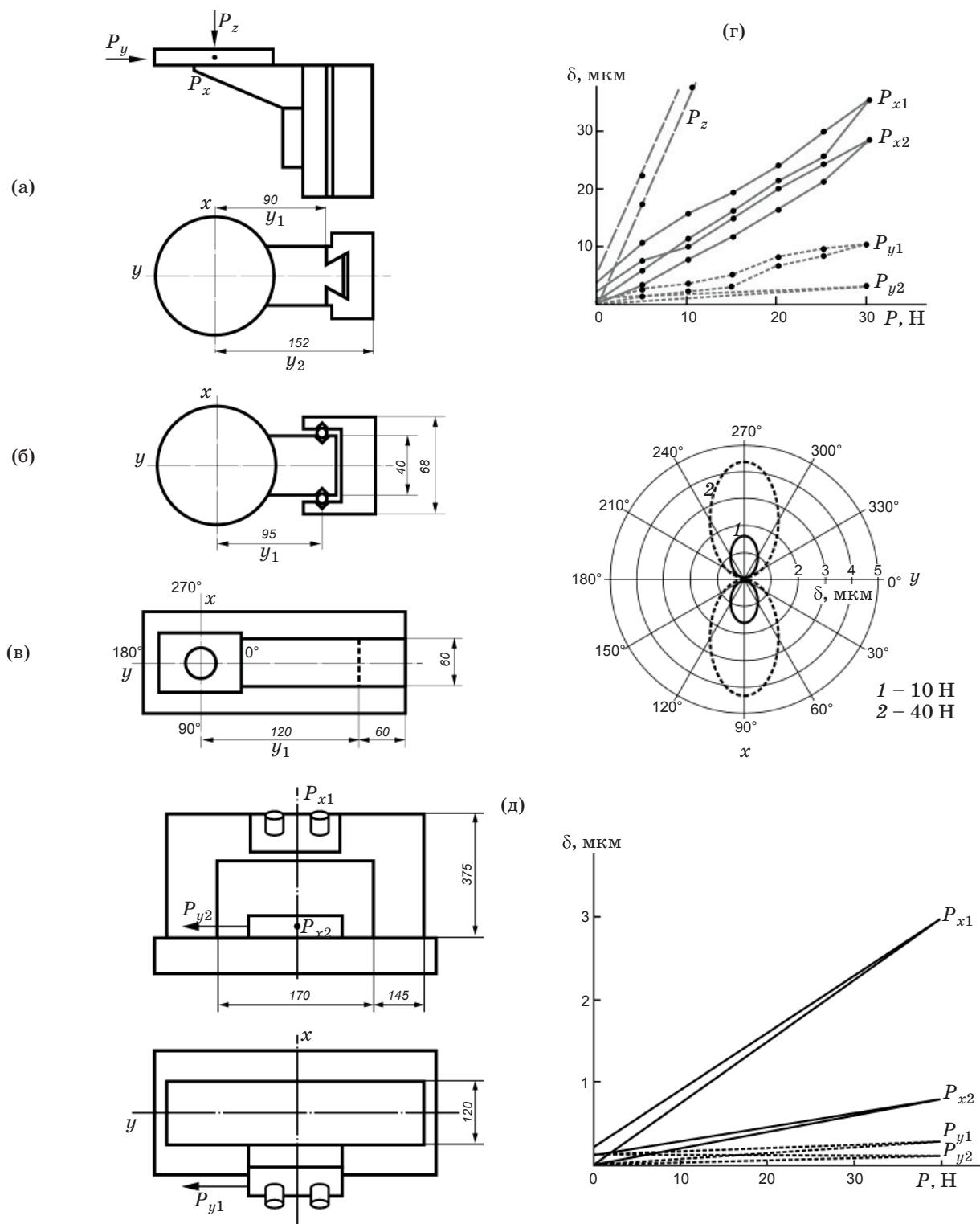


Рис. 3. Экспериментальное исследование жесткости.

чения (рис. 3б) и круговая диаграмма (рис. 3г) консольной Г-образной НК (рис. 3в). На рис. 3д приведены смещения порталной конструкции. Из приведенных примеров видно, что жесткость подвижных соединений значительно ниже неподвижных.

При аналитическом определении смещений учитывают характер соединения составных частей: последовательное, параллельное или смешанное.

Опыт показал, что у направляющих скольжения основные смещения возникают за счет

зазоров и смазочных слоев, у направляющих качения – за счет контактных деформаций в стыках деталей. При расчетах было принято, что упругая деформация  $\delta$  (мкм) под действием нагрузки  $P$ , (Н) определяется зависимостью:

$$\delta = kP,$$

где  $k$  – коэффициент податливости, мкм/Н.

На рис. 3 видно, что наименьшую жесткость консольные конструкции имеют по оси  $X$ . В обобщенном виде жесткость  $C_x$  определится формулой [2, 3]:

$$C_x = AL^2/y^2,$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от числа шариков, площади соприкосновения поверхностей, коэффициента податливости;  $L$  – размер базы;  $y$  – вылет конструкции от базовой поверхности до точки приложения нагрузки.

Таким образом, увеличение размера базы  $L$  и уменьшение вылета  $y$  помогают значительно повысить жесткость конструкции  $C$  (рис. 3).

Кроме важного влияния на стабильность положения оптической системы, жесткость определяет и виброустойчивость НК.

Частоту собственных колебаний  $f$  можно определить из формулы [2]:

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{m}} = \frac{15,8}{\sqrt{\delta}},$$

где  $m$  – масса.

Задаваясь значением  $\delta$ , равным точности функционирования ОП или вычисленным значением, а также измеренным при испытаниях НК, можно определить частоту собственных колебаний, которая не будет нарушать функционирование или совпадать с частотой собственных колебаний конкретной конструкции. У многих ОП частота собственных колебаний находится в пределах 20–60 Гц. Исследования также показали тесную связь смещения направляющих качения и мертвого хода. Обычно сборщики стараются сжать боковые планки направляющих. Но при плотно сжатых направляющих, из-за дефектов изготовления деталей и превышения деформаций за пределы упругих в отдельных местах направляющих возможно нарушение процесса качения и замена его “протаскиванием” сепаратора с телами качения. Появляется трение скольжения, что приводит к увеличению мертвого хода.

Важную роль имеет жесткость и в приводных механизмах. Увеличение жесткости привода и применение гелиевых демпфирующих

смазок [2, 4] позволяют существенно повысить точность измерений.

**Повышение стабильности ОП** тесно связано с оптимизацией НК за счет уменьшения усилий и смещений в приборах. Рассмотрим примеры, показывающие повышение стабильности за счет оптимизации оптических систем.

На рис. 4а представлена обычная схема голограмического микроскопа. После разделения светового пучка лазера 1 длина хода лучей между зеркалами 2, 3 и голограммой 4 достаточно велика. Во второй ветви находятся объект 6 и микроскоп 7, которые перемещаются с помощью подвижных узлов. Поэтому даже небольшие раздельные воздействия в каждой из ветвей приводят к существенному искажению голограммы 4. На рис. 4б разделение луча на эталонный и объектный производится призмой 8 и диффузором 9. Вследствие значительного уменьшения размеров и отсутствия подвижных узлов в объектной ветви влияние внешних условий значительно сокращается, и микроскоп работает в обычных лабораторных условиях. На рис. 4в приведена схема интерференционного рефрактометра в двух вариантах. В первом предусмотрены кристаллические пластины 1, которые разделяют и соединяют световые пучки, в одном из которых установлен объект 2.

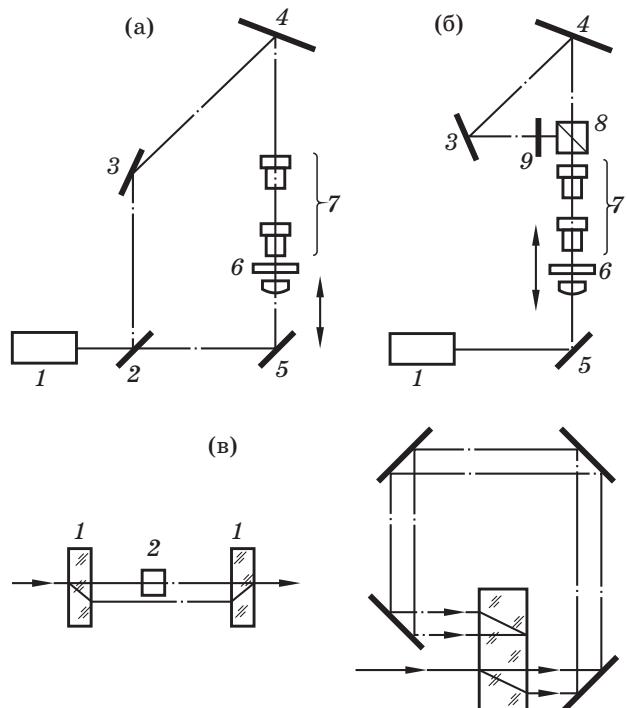


Рис. 4. Оптимизация стабильности оптических схем.

Схема имеет значительные часовые смещения до  $10^{-2}\lambda$ . Во втором варианте разделения и соединения пучков осуществляются одной пластиной, что позволяет уменьшить смещения до  $10^{-5}\lambda$ , за счет исключения смещений пластин 1.

Для повышения стабильности механической части ОП следует дополнительно:

1. Уменьшать количество соединений, особенно подвижных, применяя неподвижную установку оптических узлов, взамен юстировочных механизмов, повышать уровень моноблочности.

2. Увеличивать жесткость с подвижными узлами за счет расположения оптической оси между опорными механическими базами. Избегать консолей, вылетов кронштейнов и других подобных конструкций, заменяя их замкнутыми рамами (арками).

3. Остаточные смещения при снятии нагрузки не исчезают и приводят к расцентровке оптической системы. Ориентировочное соотношение остаточных смещений направляющих с трением скольжения, качения и при молекулярном трении составляет примерно 100:10:1.

4. Необходимо выбирать место приложения усилий в направлении наибольшей жесткости.

5. Желательно деформации изгиба и кручения заменять на деформации растяжения и сжатия. Отметим и необходимость оптимизации поперечного сечения деталей.

6. Следует уменьшать температурные деформации НК за счет теплопроводности, конвекции и теплового излучения. При этом, необходимо помнить, что оптические детали могут нагреваться и при прохождении через них светового потока.

Таким образом, для многих современных приборов, использующих большие увеличения, интерференцию или другие методы с повышенной чувствительностью, стабильность НК является основной характеристикой, определяющей надежность эксплуатации и изготовления ОП. Стабильность конструкции должна соответствовать особенностям функционирования прибора. При этом степень соответствия теоретической и действительной жесткости является показателем качества конструкции прибора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлоконструкций станков (основы компонетики). М.: Машиностроение, 1978. 214 с.
2. Рагузин Р.М. Принципы системного проектирования оптических приборов. СПб.: ИТМО. 2006. 282 с.
3. Рагузин Р.М. Упругие и остаточные смещения в микроскопах // ОМП. 1970. № 1. С. 33–36.
4. Рагузин Р.М. Влияние демпфирующих смазок точных направляющих скольжения оптических приборов на точность позиционирования // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 4. С. 37–38.