

А. П. Смирнов, С. М. Латыев, Д. В. Марков, С. А. Чугунов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДОПУСКОВ НА ПЕРВИЧНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ МИКРООБЪЕКТИВОВ ПО МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

Проведено сравнение допусков на первичные погрешности микрообъективов с использованием компьютерной модели оптической системы в среде MathCad. Качество объектива оценивалось по пятну изображения точечного объекта. Допуски назначались исходя из соотношения размеров абберационного геометрического и дифракционного пятен.

Ключевые слова: допуск, погрешность, оптическая система, модель, микрообъектив, абберация, дифракция.

Важной задачей оптического производства является автоматизация сборки оптико-механических узлов и функциональных устройств, в частности, микрообъективов (МО). Автоматизация сборки микрообъективов предполагает создание роботизированной линии, включающей операции транспортировки, сбора банка данных и адаптивно-селективной сборки МО на основе информации по виртуальной сборке МО [1]. Такая линия разрабатывается в НИУ ИТМО совместно с Техническим университетом Ильменау [2].

Эффективность автоматизации сборки определяется уровнем допусков, рассчитанных по одному из критериев качества изображения, подтвержденных проверочным расчетом и требуемых для полной взаимозаменяемости сборочных единиц. В этом случае поля рассеяния первичных погрешностей находятся в пределах допусков и сборка выполняется без дополнительных операций переборки, обработки и юстировки. Однако при производстве микро-

объективов принцип взаимозаменяемости не используется в силу невозможности обеспечения требуемого уровня допусков. Сборка в этом случае требует дополнительной обработки деталей и многочисленных юстировок. Задачей разрабатываемой линии автоматизированной сборки является минимизация или полное исключение дополнительных операций за счет предварительного сбора информации о технологических погрешностях параметров МО и взаимной компенсации [3] возникающих в процессе сборки скалярных и векторных погрешностей.

Следует различать два вида допусков:

1) технологические допуски на конструктивные параметры элементов оптической системы. Например, погрешности характеристик материала формы и размеров оптических деталей. Они не зависят от конструкции крепления элементов устройства;

2) погрешности положения оптических элементов. Они зависят от выбранной конструкции крепления линз МО и связаны размерными цепочками с погрешностями конкретной конструкции устройства (эксцентриситеты, наклоны рабочих и базовых элементов, торцевые биения опорных плоскостей, зазоры и овальность в отверстиях). Если размерная цепочка достаточно длинна, то допуск на положение оптического элемента может оказаться невыполнимым из-за чрезмерно высоких требований к допускам на первичные погрешности элементов конструкции (последние тем жестче, чем длиннее размерная цепочка).

Для исследования зависимости качества изображения микрообъективов от допусков на их первичные погрешности зададимся единым уровнем допуска на суммарную погрешность положения оптических поверхностей. При этом для удобства построения модели оптической схемы микрообъектива децентрировку поверхности, вызванную смещением центра кривизны, будем рассматривать как поперечное смещение вершины поверхности и наклон нормали в этой точке. В модели под оптической осью будем понимать направление, совпадающее с декартовой осью аппликата во внешней системе координат и совпадающее с оптической осью номинальной оптической системы. Вершины поверхностей номинальной оптической системы находятся в соответствующих точках оси аппликата, нормали к поверхностям в точках вершин также лежат на оси аппликата.

Кроме погрешности децентрировки поверхности будем учитывать погрешности формы поверхностей: общую погрешность радиуса и местную погрешность цилиндричности как разность радиусов по ортогональным направлениям, погрешности материала, толщины и показателей преломления сред.

В настоящей работе влияние допусков на качество изображения в микрообъективе оценивается по двум уровням: предельно выполнимый в заданных условиях производства, условно названный „технический“ уровень, второй — более мягкий — „экономический“ (табл. 1).

Таблица 1

№	Погрешность	Единицы измерения	„Экономический“ уровень	„Технический“ уровень
1	Общая погрешность формы	полоса	2	0,5
2	Неплоскостность	полоса	3	0,5
3	Местная погрешность формы, цилиндричность	полоса	0,5	0,05
4	Децентрировка поверхности (с учетом крепления)	мкм	10	2
5	Погрешность толщин и воздушных промежутков	мкм	20	5
6	Погрешность показателя преломления	10^{-4}	10	2

Основным параметром для расчета первичных допусков является критерий качества изображения, в качестве которого используют различные aberrации (волновые, лучевые, поперечные, продольные, осевые, полевые, третьего порядка, интегральные, отнесенные к

гауссовой плоскости или к плоскости наилучшего наведения), функцию рассеяния точки или изображения мира.

В разрабатываемой линии сборки качество изображения оценивается по реальному пятну рассеяния, которое определяется суммарной поперечной аберрацией. Если пятно, полученное в результате трассировки лучей, не превышает дифракционного пятна, то в качестве порогового размера пятна рассеяния выбираем диаметр кружка Эри. Если аберрационное пятно превышает дифракционное, то кроме размера пятна будем учитывать его структуру, определяющую среднее квадратическое отклонение (СКО). Суммарную погрешность в этом случае определим как заданную величину, например, 130 % от СКО интегральной поперечной остаточной аберрации, не имеющей первичных погрешностей системы, на основной линии спектра в плоскости наилучшего наведения по минимуму СКО.

Как было отмечено в работе [4], практика проектирования объективов показала, что наиболее удобным и близким к условиям производства способом расчета допусков является так называемый метод попыток, согласно которому на технологические погрешности конструктором предварительно устанавливаются те допустимые величины отклонений, которые еще могут быть получены в заданных условиях производства.

Математическая модель оптической системы разработана в среде MathCad [5]. Модель позволяет выполнять все необходимые операции для построения пятна рассеяния и определения характеристик изображения и расчета допусков.

Допуски δq рассчитываются по методу соответствия коэффициентам влияния:

$$\delta q = \frac{\Delta_{\Sigma}}{A(K + C)\lambda}, \quad (1)$$

где Δ_{Σ} — допустимое значение суммарной погрешности, A — передаточный коэффициент, K — относительный коэффициент рассеяния, учитывающий отступление закона рассеяния погрешности от нормального и величину поля допуска, C — приведенный коэффициент асимметрии, учитывающий сдвиг центра группирования поля рассеяния от центра поля допуска, λ — коэффициент влияния совокупности первичных погрешностей, учитывающий их число и тип.

На первом шаге расчетов формула (1) упрощается: $K = 1$, $C = 0$, $\lambda = \sqrt{n}$, где n — общее число случайных первичных погрешностей. На втором шаге допуски корректируются в соответствии с заданными границами (см. табл. 1): более мягкий рассчитанный допуск, выходящий за выбранные пределы, заменяется допуском „экономического“ уровня, а более жесткий, невыполнимый, смягчается до уровня „технического“. Для исследуемых в качестве примера микрообъективов распределение допусков преимущественно находилось на „техническом“ уровне.

На третьем шаге осуществляется проверка полученных допусков методом Монте-Карло. Значения полученных допусков на первичные погрешности служат границами, в которых случайным образом для заданного числа реализаций задаются текущие значения отступлений параметров от их номинального значения, генерируются реальные первичные погрешности.

В работе [4] исследован характер функций распределения вероятности погрешностей объективов. Показано, что погрешности радиусов, толщины и воздушных промежутков распределены по нормальному закону. Модули поперечных смещений и наклонов поверхностей распределены по закону Рэлея, а их азимутальные углы — по равномерному закону. Если вычисленное значение СКО превышено более чем на значение суммарной погрешности, то схема считается условно неудовлетворительной (брак).

Описанная методика использована для сравнительного анализа микрообъективов марки ОСХ с увеличениями и апертурами 5×0,12, 20×45, 63×85 и иммерсионного объектива 100×1,4 с тубусом „бесконечность“. Конструктивные параметры микрообъективов представлены в табл. 2.

Таблица 2

ОСХ 5×0,12				ОСХ 20×0,045			
Деталь	R, мм	t, мм	Марка, среда	Деталь	R, мм	t, мм	Марка, среда
Покровное стекло	∞	—	Воздух К14	Покровное стекло	∞	—	Воздух К14
Фронтальная линза	35,65 10,99	26,091 6,0	Воздух ТФ2	Фронтальная линза	∞ -5,035	26,091 6,0	Воздух СТК12
Линза	11,342 -20,23	0,3 6,0	Воздух БК6	Линза	-22,8 8,63 -11,272	0,3 1,4 4,5	Воздух ТФ5 ЛК3
Тубусная линза	214,8 -46,99	100,0 5,0	Воздух БК8	Линза	18,923 -23,23	5,0 3,5	Воздух ЛК3
Тубусная линза	-46,88 -113,24	0,3 3,0	Воздух БФ12	Линза	9,863 7,907	6,0 2,0	Воздух ТФ5
ОСХ 63 × 0,85				Тубусная линза	214,8 -46,99	100,0 5,0	Воздух БК8
Покровное стекло	∞	—	Воздух К14	Тубусная линза	-46,88 -113,24	0,3 3,0	Воздух БФ24
Фронтальная линза	-2,377 -1,977	0,35 2,33	Воздух СТК19	ОСХ 100 × 1,4			
Линза	25,7 5,834 -4,786	0,2 1,3 3,0	Воздух ТФ3 ЛК3	Покровное стекло	∞	—	Кедровое масло К14
Линза	101,16 5,834 -8,166	0,1 1,2 3,6	Воздух ТФ5 ЛК3	Фронтальная линза	∞ -0,832	0,1 1,0	Кедровое масло К8
Линза	5,834 4,13	16,9 3,44	Воздух ТФ5	Линза	-3,631 -2,291	0,1 1,7	Воздух ЛК3
Тубусная линза	214,8 -46,99	90,0 5,0	Воздух БК8	Линза	37,24 5,943 4,365	0,1 1,0 3,2	Воздух ТФ1 ЛК3
Тубусная линза	-46,88 -113,14	0,3 3,0	Воздух БФ24	Линза	16,069 4,365 -29,31	0,1 1,0 2,3	Воздух ТФ3 ЛК3
—	—	—	—	Линза	5,943 4,13	17,9 4,0	Воздух ТФ5

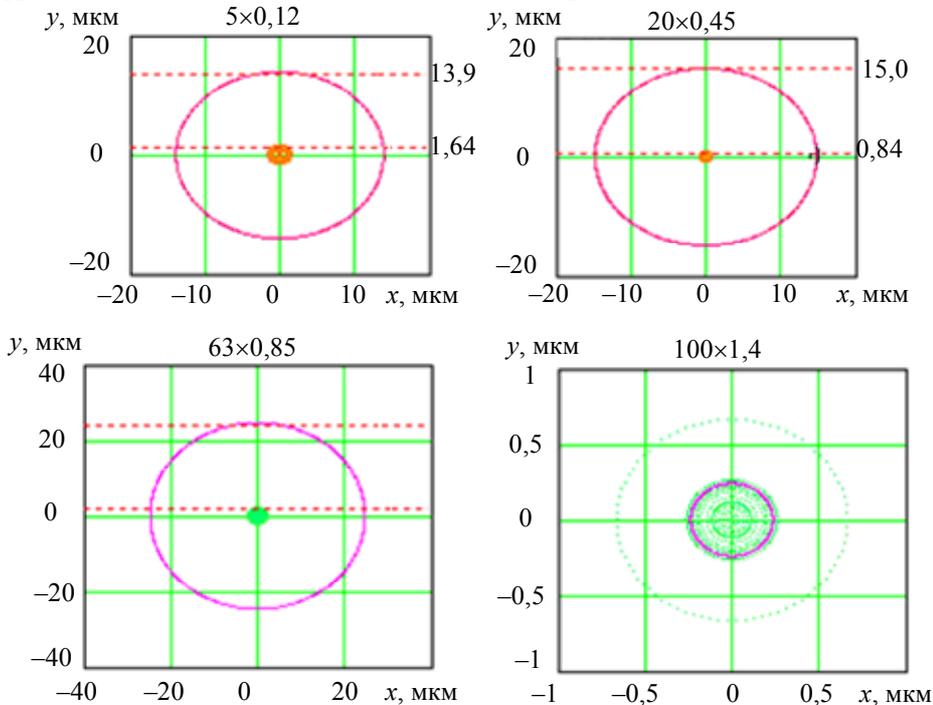
Исследуемый микрообъектив в плоскости изображения строит пятно рассеяния, размер которого определяется aberrациями. Сравнение проводится на основе размера пятна рассеяния микрообъектива в плоскости наилучшей установки с размером кружка Эри. Радиус дифракционного пятна определяется длиной волны $\lambda=0,546$ мкм, на которой происходит оптимизация системы, и передней апертурой объектива A . В пространстве изображения (в передней фокальной плоскости окуляра) он увеличивается в соответствии с линейным увеличением V объектива:

$$\rho_{\text{Э}} = \frac{0,61\lambda}{A} V. \quad (2)$$

Для исследуемых микрообъективов на рисунке представлено отношение радиусов дифракционного и aberrационного пятен в случае нахождения точки предмета на оси.

Согласно дифракционной теории aberrаций [6], при увеличении aberrаций истинное изображение приближается к изображению, рассчитанному в соответствии с законами

геометрической оптики. Оно пересекается интерференционными полосами, возникшими из-за дифракции на диафрагмах оптической системы. В рассматриваемых объективах с увеличением до $100\times$ радиус кружка Эри примерно на порядок больше радиуса абберрационного пятна, поэтому расширение абберрационного пятна из-за увеличения первичных погрешностей до размеров дифракционного пятна приведет к модуляции интенсивности пятна и к увеличению его размеров. Снижение разрешения микроскопа при увеличении абберрационного пятна до размеров дифракционного с данным объективом не произойдет.



Допустимое значение суммарной погрешности определяется размером абберрационного пятна, приравненного к размеру дифракционного или увеличенного на 30 % абберрационного пятна, если оно больше абберрационного. Для каждого объектива генерируется 100 реализаций со случайными значениями первичных погрешностей в заданных пределах (см. табл. 1). Процент реализаций, при которых размер абберрационного пятна выходит за границы дифракционного пятна, растет с увеличением сложности микрообъектива. Для объектива $100\times 1,4$ абберрационное пятно изначально было больше дифракционного, для части реализаций (примерно 4 %) СКО пятна рассеяния оказалось меньше рассчитанного. Это указывает на тот факт, что параметры объектива не являются оптимальными и требуют дальнейшей оптимизации.

Существует понятие „полезное увеличение“, определенное для случая, когда наблюдатель полностью использует разрешающую силу микроскопа. Наблюдатель должен применить окуляр с таким увеличением, при котором изображение радиуса кружка Эри через окуляр в среднем составляло бы с глазом наблюдателя при расстоянии 250 мм угловую величину 3 мин [7], равную в линейном измерении Δ , тогда максимальное увеличение окуляра будет ограничено размером дифракционного пятна. Разрешающая сила микроскопа в этом случае максимально возможная, дифракционная. Если абберрационное пятно в K раз больше дифракционного, то во столько же раз уменьшается полезное эффективное увеличение микроскопа и определяется формулой:

$$V_M = V\Gamma_{ок} = V \frac{\Delta}{\rho_{\text{Э}} K} = \frac{655A}{K}, \quad (3)$$

где V_M — линейное увеличение микроскопа, $\Gamma_{ок}$ — видимое увеличение окуляра. Результаты расчетов максимального увеличения микроскопа с исследуемыми микрообъективами приведены в табл. 3.

Таблица 3

Микрообъектив	Полезное увеличение	K	Эффективное увеличение
5×0,12	78,6	2,7	29,1
20×0,45	294,75	4,6	64,1
63×0,85	556,75	3,6	154,7
100×1,4	917	28	32,7

Проведенное модельное исследование продемонстрировало:

- 1) возможность точностного анализа микрообъективов с помощью разработанной модели оптической системы и возможность выявления ситуации, при которой параметры объектива не являются оптимальными;
- 2) эффективность использования метода Монте-Карло для количественного анализа характеристик микрообъектива в составе микроскопа. Снижение полезного увеличения микроскопа сопровождается уменьшением разрешающей способности микрообъектива;
- 3) необходимость в дополнительных операциях (юстировка, обработка) при заданных уровнях допусков. Она пропорциональна доли реализаций проверочного расчета микрообъективов, имеющих пятна рассеяния больше дифракционного пятна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smirnov A. P.* Mathematicsches Modell zur virtuellen Montage von Mikroskopobjektiven // Interner Workshop "Flexible Montage". Technische Universitat Ilmenau. 2010. Marz.
2. *Латыев С. М., Смирнов А. П., Табачков А. Г., Фролов Д. Н., Шухат Р. В.* Проект линии автоматизированной сборки микрообъективов // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 11. С. 7—13.
3. *Schuchk K.* Methodik Messung der Zentrierungssysteme // Optik. 1959. N 16.
4. *Крынин Л. И.* Основы проектирования конструкций объективов. СПб: ГУ ИТМО, 2006.
5. *Смирнов А. П.* Модель оптической системы в среде MathCAD // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 4. С. 56—62.
6. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970.
7. *Панов В. А., Андреев Л. Н.* Оптика микроскопов. М.: Машиностроение, 1976. С. 27.

Сведения об авторах

- Александр Павлович Смирнов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: apsmirmov@bk.ru
- Святослав Михайлович Латыев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; заведующий кафедрой; E-mail: latyev@grv.ifmo.ru
- Данил Владимирович Марков** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Сергей Александрович Чугунов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию
25.11.11 г.