

**Выводы:**

1. Проведенные исследования шарнирного четырехзвенника исполнительного механизма станка позволили установить аналитическую связь между входным и выходным звеньями этого механизма, что дало возможность рассчитать длину первого из отмеченных звеньев в зависимости от требуемой величины амплитуды колебательного движения второго из них.

2. Созданы предпосылки для разработки инженерных методов управления процессом формообразования высокоточных конических поверхностей в условиях свободного притирания.

3. Обеспечена возможность исключить предварительные трудоемкие эксперименты по выявлению оптимальных наладочных параметров технологического оборудования в каждом конкретном случае.

**Литература**

1. Бардин А.Н. Технология оптического стекла / А.Н. Бардин. – М.: Высшая школа, 1963. – 519 с.
2. Зубаков В.Г. Технология оптических деталей / В.Г. Зубаков, М.Н. Семибратов, С.К. Штандель; под ред. М.Н. Семибратова. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.
3. Козерук А.С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / А.С. Козерук. – Минск, 1997. – 317 с.
4. Сулим А.М. Производство оптических деталей / А.В. Сулим. – М.: Высшая школа, 1969. – 303 с.
5. А.С. Козерук, Р.О. Диас Гонсалес, М.И. Филонова, В.О. Кузнецик, Е.Н. Варопай. Кинематический анализ способа, повышающего точность обработки конических поверхностей Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2019. – Т. 64, № 4. – С. 429–437.
6. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский – М.: Наука, 1988. – 640 с.

УДК 535.243:391.2

**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ МИКРОЛИНЗ**Фильчук А.С.<sup>1</sup>, Фёдорцев Р.В.<sup>2</sup><sup>1</sup>ООО «ЭссентОптика»

Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

В последние десятилетие наблюдается тенденция к миниатюризации оптико-электронных приборов в целом и их оптических компонентов в частности. Наиболее широкий класс таких деталей составляют фокусирующие элементы: первые линзы сверхсильных иммерсионных микроскопов, линзы объективов в фотографических камерах смартфонов, наконечники эндоскопов, лазерные модули, волоконная связь и многие другие.

К миниатюрным относятся оптические детали с геометрическими размерами: диаметром  $D = 0,5 \pm 0,001 - 10 \pm 0,01$  мм, при световом диаметре  $> 85 - 95$  %, отношением  $R/D = 1,0 - 0,5$ , децентричностью  $0,02 - 0,01$  мм, точностью формы сферической поверхности  $\lambda/2 - \lambda/10$  при  $633$  нм, шероховатостью  $Rz0,1$  мкм, чистота поверхности Р IV. Одним из определяющих параметров для микролинз является качество формируемого изображения: диаметр фокального пятна составляет  $2,3 - 2,8$  мкм. Материалом для изготовления микролинз являются: оптическое стекло К8; кварц КУ-1, КВ и КИ; кристаллы Ge, Si, ZnSe, ZnS, KRS5, CaF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub>, LiF, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а также другие материалы из каталогов ГОСТ, Schott и OHARA [1]. Серийное технологическое производство микрооптики осуществляется преимущественно на оборудовании компании «Optotech», а нанесение оптических покрытий для УФ, видимого и ИК-диапазона на установках компании «Leubold Optics».

Для уменьшения влияния отраженного света на итоговое изображение объектива на рабочие поверхности микролинз наносят просветляющие оптические покрытия, повышающие коэффициент пропускания вплоть до  $99,9$  %.

Поэтому возникает необходимость в контроле качества нанесенного просветляющего оптического покрытия на поверхности микролинз с помощью спектрофотометра. Однако в настоящее время на рынке оптико-электронных приборов не представлено ни одного спектрофотометра, позволяющего контролировать качество покрытий на сферических поверхностях малых диаметров и радиусов кривизны.

Контроль просветляющего покрытия на сферических поверхностях микролинз на пропускание, т. е. измерение света после прохождения через поверхности линзы, будет вносить дополнительную погрешность измерения. Так как в этом случае свет пройдет через обе поверхности линзы.

Согласно закону сохранения энергии падающий световой поток (принятый равным единице) при переходе из менее плотной среды в более плотную, представляет собой сумму коэффициентов пропускания, отражения, поглощения и рассеяния:  $\tau + \rho + \gamma + \alpha = 1$

Так как коэффициенты поглощения и рассеяния на поверхностях с просветленным оптическим покрытием достаточно малы по отношению к коэффициентам пропускания и отражения, то

при проведении численных расчётов ими пренебрегают.

В связи с этим целью работы является разработка спектрофотометра для измерения коэффициента отражения от сферической поверхности радиусом кривизны до  $\pm 5$  мм и диаметром до 10 мм в спектральном диапазоне 380–990 нм.

Спектрофотометр будет построен на основе монохроматора по схеме Черни-Тернера. Источник излучения – галогенная лампа мощностью 20 Вт, приёмник излучения – кремниевый фотодиод производства Hamamatsu Photonics.

Прототипом для новой конструкции спектрофотометра является модель LINZA150 производства компании ООО «ЭссентОптикс» (рисунок 1). Данный спектрофотометр предназначен для измерения спектральных характеристик пропускания и оптической плотности линз и объективов, а также отражения от поверхности линз и плоских деталей.



Рисунок 1 – Общий вид спектрофотометра LINZA150

Спектрофотометр LINZA150 имеет возможность проводить измерения коэффициентов пропускания и отражения для выпуклых, вогнутых, сферических, асферических и цилиндрических линз; диаметром от 10 до 150 мм (в режиме пропускания) и до 100 мм (в режиме отражение) с радиусами кривизны  $\pm 10$ – $\infty$  мм. Фокусное расстояние линз должно быть в диапазоне  $\pm 20$ – $\infty$  мм для режима пропускания и  $\pm 15$ – $\infty$  мм для режима отражения [2].

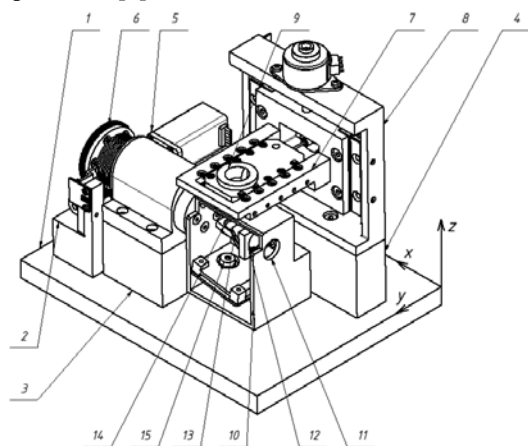


Рисунок 2 – Измерительный канал спектрофотометра: 1 – основание; 2, 3, 4 – кронштейны; 5 – червячный привод; 6 – вал с червячным колесом; 7, 8 – узлы смещения; 9 – оправа; 10 – измерительный узел; 11 – входное отверстие измерительного узла; 12 – фокусирующая линза в оправе; 13 – зеркало в оправе; 14 – линза в оправе; 15 – фотоприемник

Параллельный пучок после монохроматора и подвижной линзы (на рисунке 2 не показаны) проходит входное отверстие измерительного узла 11, фокусируется линзой в оправе 12, поворачиваясь зеркалом 13, на измерительной детали в оправе 9.

Излучение от детали отражается на линзу в оправе 14 и собирается на чувствительной площадке фотоприемника 15.

Узел спектрофотометра имеет возможность перемещаться вдоль осей  $y$  и  $z$ , а также вращаться вокруг оси  $x$ , что позволяет измерять коэффициент отражения от сферических поверхностей с минимальным радиусом кривизны  $\pm 5$  мм и на максимальном диаметре 6 мм.

Для расчёта максимального угла поворота луча относительно измеряемой детали обратимся к рисунку 2, данный угол будет равен разнице углов между касательной и хордой, проведенной в точку касания, и углом падения луча в нормальном положении.

Граничные условия, которые необходимо выполнить в соответствии с техническим заданием, являются минимальный радиус кривизны 5 мм и максимальный диаметр 6 мм.

Из геометрии известна теорема об угле между касательной и хордой, проведенной в точку касания: угол между касательной и хордой, проведенной в точку касания равен половине дуги, стягиваемой этой хордой (рисунок 3).

Таким образом:

$$\angle BMN = \frac{\overset{\frown}{MN}}{2}. \quad (1)$$

При этом известно, что значение дуги в градусной мере равно центральному углу окружности, то есть:

$$\overset{\frown}{MN} = \angle MON. \quad (2)$$

Центральный угол окружности связан с длиной хорды и радиусом кривизны следующим соотношением:

$$MN = 2R \sin\left(\frac{\angle MON}{2}\right), \quad (3)$$

где  $R$  – радиус кривизны, мм.

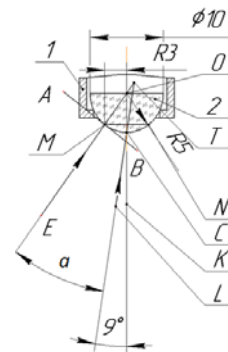


Рисунок 3 – Схема для определения максимального угла наклона луча относительно измеряемой детали: 1 – оправа приспособления; 2 – измеряемая поверхность детали

Из формулы (3) выразим центральный угол

$$\angle MON = 2 \arcsin\left(\frac{MN}{2R}\right). \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в формулу (1), учитывая равенство (2), получим

$$\angle BMN = \arcsin\left(\frac{MN}{2R}\right) = \arcsin(0,6) = 36^\circ$$

Тогда максимальный угол поворота луча относительно измеряемой детали будет равен

$$\angle ETL = \angle BMN - \angle LCK = 36^\circ - 9^\circ = 27^\circ,$$

где  $\angle LCK = 9^\circ$  – это угол падения луча на сферическую поверхность измеряемой детали, известный из оптической схемы.

Таким образом максимальный угол поворота луча, который необходимо конструктивно обеспечить  $\alpha = 27^\circ$ .

#### Литература

1. Производственная компания ООО «МакроОптика». Россия. Москва. Буклет. – 20 с. <https://macrooptica.ru/f/macrooptica.pdf>.
2. ООО «ЭссентОптикс». Беларусь. Минск. Буклет. – [https://www.essentoptics.com/f/file/LINZA\\_rus\\_092019.pdf](https://www.essentoptics.com/f/file/LINZA_rus_092019.pdf).

УДК 621.3.038.825.2

### АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВОЛОС МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-ИСКРОВОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Шор Р.В.<sup>1</sup>, Ясюкевич А.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «СОЛ инструментс»

Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Волосы человека несут информацию о метаболических изменениях концентраций химических элементов в организме за продолжительное время и содержат следы протекавших в нем биохимических процессов. Измерение концентраций химических элементов в волосах делает возможным диагностику дисбаланса витаминов и минералов, определение превышения допустимых норм токсичных веществ, а также установления причин различного рода загрязнений организма и выявление их источников. К примеру, значительное превышение свинца в организме может приводить к спазмам и болям в конечностях, поражению органов кроветворения и почек, бериллия – к угнетению многих ферментов и появлению аутоиммунных заболеваний многих ферментов и появлению аутоиммунных заболеваний. Недостаток или переизбыток какого-либо химического элемента говорит о необходимости коррекции не только рациона питания, но и множества других факторов [2]. Именно поэтому данное направление анализа так перспективно как в диетологии, так и в медицине вообще.

Лазерноискровая эмиссионная спектроскопия (ЛИСП) – метод спектрального элементного анализа, в котором анализируют спектры плазмы лазерной искры с поверхности исследуемого образца. Лазер создает на поверхности материала облако плазмы, свечение которой направляется оптической системой в спектрометр для последующего анализа. Преимущество данного метода для анализа волос человека перед другими заключается в том, что в настоящее время он позволяет определять массовое содержание 26 хи-

мических элементов в образце менее чем за 30 минут. Достаточно 50 мг волос для проведения анализа. Сложная пробоподготовка, как в методе индуктивно-связанной плазмы, не требуется. Так же безусловным плюсом можно считать возможность определения характера изменения концентраций химических элементов от корней пучка волос до их кончиков, производя последовательный ряд измерений на разной длине пряди. Это возможно благодаря малой зоне анализа, в то время как в рентгенофлуоресцентном методе, к примеру, можно получить только усредненное значение содержания элементов.

В методе ЛИСП спектры излучения исследуемого образца сравниваются со спектрами излучения эталонов (стандартных образцов), имеющих аттестованные значения концентраций химических элементов. В данной работе использовались международные сертифицированные стандартные образцы серий NCS DC 73347 и NCS ZC 81002.

Нами были проведены исследования волос мужчины в возрасте 40 лет без видимых патологий. Спектральная область, исследовании составила около 400 нм. Для железа, например, было выбрано 6 характеристических линий, нм: 258,5876, 259,9396, 261,1874, 261,3825, 302,0639, 404,5813. Увеличение количества характеристических спектральных линий для анализа повышает точность и уменьшает ошибку определения содержания элементов. Режим возбуждения плазмы – двухимпульсный, это позволяет значительно повысить интенсивность спектральных линий.